

Desenvolvimento do processo de fundição por baixa pressão para a obtenção de puxadores em ligas de alumínio

INEGI

Rúben Miguel Monteiro Duarte

Dissertação do MIEM

Orientador no INEGI: Rui Jorge de Lemos Neto

Orientadora na FEUP: Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho de 2014

Aos meus pais e irmã

Resumo

A fundição em coquilha por baixa pressão enquadra-se nos processos de fundição em moldações permanentes, e surgiu no seio da indústria automóvel para a produção de jantes em ligas de alumínio. Devido ao seu enorme potencial, nomeadamente a sua capacidade única de controlo do enchimento, é cada vez mais utilizado na produção de componentes com elevada integridade, para os mais variados ramos da indústria. O INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial), em parceria com a STA (Sociedade Transformadora de Alumínios, SA), pretende desenvolver a referida tecnologia para a obtenção de puxadores de portas em ligas de alumínio, como alternativa aos atuais processos de fundição existentes na STA, para a produção de fundidos com melhor qualidade.

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento do processo de fundição em coquilha por baixa pressão, e poderá ser subdividido em dois subproblemas: o projeto da coquilha que irá dar forma às peças, e a criação do modelo de uma estrutura que permita realizar vazamentos por baixa pressão. Referente ao último tópico, a estrutura a desenvolver deverá garantir a adaptação e movimentação de uma coquilhadora no topo de um forno de cadinho, pré-existente nas instalações do INEGI. A aplicação deste processo de fundição à produção dos referidos puxadores permitirá a obtenção de peças com um menor número de defeitos e com menores taxas de rejeição relativamente aos demais processos de fundição existentes na STA.

Utilizaram-se *softwares* de modelação 3D e de simulação numérica: o SolidWorks, para a elaboração do conceito da estrutura e simulação dos esforços gerados, e o ProCAST, como ferramenta de simulação numérica para ensaiar diferentes condições de solidificação e enchimento das peças. Simularam-se diversos modelos de gitagem e alimentação, para a otimização do rendimento e para a obtenção de peças fundidas com uma baixa percentagem de defeitos, sem rechupes ou porosidades superficiais.

Através da metodologia referida, foi elaborado com sucesso o modelo da estrutura de adaptação da coquilhadora ao forno, sendo que a simulação estrutural realizada indicia que as tensões e deformações geradas na estrutura apresentam valores perfeitamente admissíveis. Relativamente à ferramenta, esta foi projetada de modo a trabalhar em duas posições distintas, e a simulação numérica antecipa que a solidificação se realiza de forma direcional, obtendo-se puxadores isentos de defeitos relevantes, associada a um curto tempo de ciclo e um elevado aproveitamento global do processo.

Abstract

Low Pressure Die Casting is a permanent mould casting process that emerged from the automotive industry for the production of aluminium alloy wheels. Due to its large potential, such as the excellent ability to control the fillings, is being increasingly used for the production of high integrity components for numerous branches of the industry. INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial), in a partnership with STA (Sociedade Transformadora de Alumínios, SA), aims to develop the referred technology as an alternative to the current STA existing foundry processes, for the production of aluminium door handles with better quality.

The main goal of this thesis is the development of the Low Pressure Die Casting technology and it can be divided in two sub-topics: first, the project of the die that will shape the pieces, and second, the creation of a structure model that can be used to pour the medal into the die. Regarding the last topic, the structure should ensure the movement of the die at the top of a pre-existing crucible furnace. The use of this foundry process for the production of aluminium alloy door handles will allow the output of products with less defects and lower rejection rates comparing with other casting methods performed by the STA.

During this study, it was used two different 3D modelling and numerical simulation softwares: SolidWorks, for the elaboration of the structure concept and for the simulation of the stresses and strains generated, and SolidCAST, as a numerical simulation tool, to test different filling and solidification conditions. Several gating and risering geometries were tested in order to optimize the process efficiency and to ensure the production of castings with low percentage of defects (without significant shrinkage and no superficial gas pores).

By using the referred methodology, a 3D model of the structure was developed to adapt the tool to the furnace. The structural simulation performed shows that the stresses and strains generated in the structure have perfectly admissible values. Regarding the die, it was designed to work in two different positions. The numerical simulation predicts that the solidification is directional and no relevant defects were found. The tool is expected to produce aluminium alloy door handles without defects, with short cycle time and with a high overall process efficiency.

Agradecimentos

Ao Engenheiro Rui Neto e à Engenheira Teresa Duarte, a minha gratidão pelas importantes tarefas de supervisão e orientação que desempenharam. Obrigado por todo o apoio, pelos conselhos, preciosos comentários e críticas que oportunamente me dirigiram.

Deixo também o meu obrigado a todos os colaboradores do INEGI, que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho. Dirijo um agradecimento especial ao Engenheiro Paulo Machado pelo inextinguível apoio na discussão de diversos assuntos relacionados com a minha dissertação. Agradeço do mesmo modo à Engenheira Song Nanam pela sua disponibilidade e pela valiosa colaboração na realização das simulações numéricas de solidificação e de enchimento.

Por razões óbvias e com um sentimento de forte gratidão, agradeço à minha família, em especial aos meus pais, irmã e cunhado.

Um agradecimento muito especial à minha namorada, um dos pilares base da minha vida. Obrigado por todo o apoio e preocupação ao longo da realização desta dissertação, assim como durante o decorrer da minha vida académica.

Para além de agradecer a todos os colegas e amigos universitários que me acompanharam em dias e noites de trabalho árduo, com poucas ou nenhuma hora de sono, um agradecimento especial a todos os meus amigos exteriores à FEUP, que me motivaram ao longo desta jornada.

Índice de Conteúdos

1. Introdução Geral	1
1.1 Introdução	1
1.2 Apresentação das Empresas.....	1
1.3 Enquadramento e Objetivos.....	3
1.4 Estrutura do Relatório	4
2. Estado da arte	5
2.1 Introdução	5
2.2 Processo de fundição em coquilha por baixa pressão (FCBP)	6
2.2.1 Introdução	6
2.2.2 Descrição do processo.....	6
2.2.3 Soluções construtivas e parâmetros mais importantes no controlo do processo	9
2.2.4 Vantagens, desvantagens e comparação da FCBP com outros processos de fundição	12
2.2.5 Variantes da FCBP	17
2.3 Vazamento em moldações metálicas	19
2.3.1 Introdução	19
2.3.2 Materiais utilizados no fabrico de moldações metálicas	19
2.3.3 Ligas vazadas em moldações metálicas.....	23
2.3.4 Temperatura de vazamento	24
2.3.5 Temperatura da moldação metálica.....	24
2.3.6 Revestimentos	25
2.3.7 Tensões de origem térmica em moldações metálicas.....	27
2.3.8 Defeitos típicos do vazamento em moldações permanentes.....	31
2.4 Alumínio e suas ligas.....	39
2.4.1 Introdução histórica	39
2.4.2 Produção de alumínio primário	40
2.4.3 Propriedades do alumínio puro	41
2.4.4 Classificação das ligas de alumínio	42
2.4.5 Elementos de liga e o seu efeito.....	43
2.4.6 A absorção de gases, os seus efeitos e o seu controlo	46
2.4.7 Acabamento de peças em ligas de alumínio.....	54
2.4.5 Caracterização da liga de alumínio utilizada nos puxadores da STA: A-G4Z (NF 57-702) equivalente a AlMg4Zn (NBN P21-101).....	62
2.5 Sistemas de gitagem e alimentação	65

2.5.1 Dimensionamento dos sistemas de alimentação e gitagem.....	67
2.5.2 Filtros cerâmicos.....	69
2.6 Simulação numérica	71
2.6.1 Método das Diferenças Finitas (MDF) e Método de Elementos Finitos (MEF)	72
2.6.2 O uso da simulação numérica nos processos de fundição	73
2.6.3 <i>Softwares</i> de simulação numérica.....	75
3. Trabalho Experimental	77
3.1 Introdução	77
3.2 Projeto de uma coquilha para vazamento de uma liga de alumínio (AlMg4Zn), para obter puxadores de portas através da FCBP	78
3.2.1 Geração e escolha de conceitos	81
3.2.2 Projeto dos sistemas de gitagem e alimentação	87
3.2.2.1 Simulação numérica de solidificação - parâmetros do <i>software</i>	88
3.2.2.2 Gitagem e alimentação 1 – princípios de conceito.....	92
3.2.2.3 Gitagem e alimentação 1 - resultados e discussão da simulação numérica de solidificação	97
3.2.2.4 Gitagem e alimentação 2 – princípios de conceito.....	99
3.2.2.5 Gitagem e alimentação 2 - resultados e discussão da simulação numérica de solidificação	100
3.2.2.6 Gitagem e alimentação 3 – princípios de conceito.....	102
3.2.2.7 Gitagem e alimentação 3 - resultados e discussão da simulação numérica de solidificação	102
3.2.2.8 Gitagem e alimentação 4 – princípios de conceito.....	104
3.2.3 Rotação de 180° da coquilha	107
3.2.3.1 Gitagem e alimentação 2 (rodada em 180°) - resultados e discussão da simulação numérica de solidificação	109
3.2.3.2 Gitagem e alimentação 3 (rodada em 180°) – resultados e discussão da simulação numérica de solidificação	110
3.2.4. Simulações de enchimento – apresentação e análise de resultados.....	110
3.3 Conceito e projeto de uma estrutura de adaptação de uma coquilhadora a um forno pré-existente no INEGI	116
3.3.1 Modelação 3D do conceito e o seu princípio de funcionamento	120
3.3.2 Penosidade para o operador	126
3.3.3 Simulação estrutural.....	129
4. Conclusão e Sugestão de Trabalhos Futuros	134
4.1 Conclusão	134
4.2 Trabalhos Futuros.....	135

Anexo A: Desenho 2D do conjunto da estrutura	138
Anexo B: Desenho 2D do conjunto da coquilhadora	139
Anexo C: Desenho 2D da placa móvel	140
Anexo D: Desenho 2D do forno	141
Anexo E: Desenho do puxador	142

Índice de Figuras

Figura 1: Representação esquemática dos diversos componentes envolvidos no processo de fundição por baixa pressão.	6
Figura 2: Curva pressão-tempo (P-t) para o enchimento de uma jante automóvel através da FCBP.....	7
Figura 3: Componentes típicos de um sistema de baixa pressão, com meia moldação fixa.	9
Figura 4: Componentes típicos de um sistema de FCBP, com ferramenta completamente amovível (representação da coquilha na posição de enchimento).	10
Figura 5: Unidade de fundição por baixa pressão completamente automatizada, com um forno e manipulador robótico.....	12
Figura 6: Peça em estudo (safety box cover) (a) e regiões em análise no estudo da respetiva peça (regiões Z1, Z2 e Z3) (b).	15
Figura 7: Microestruturas das zonas Z1 (a) e Z3 (b) da peça obtida por FCBP.....	16
Figura 8: Setup típico de um sistema de fundição por counter-gravity casting.....	17
Figura 9: Representação esquemática dos componentes de uma unidade de fundição por contrapressão.....	18
Figura 10: Bloco de motor do Audi V6 (a) e comutador elétrico (corpo exterior) (b), obtidos através da FCBP.	19
Figura 11: Deslocamento restrito a zero numa direção	27
Figura 12: Deslocamento restringido a zero em duas direções.....	27
Figura 13: Deslocamento restrito a zero em três direções.....	28
Figura 14: Encurvadura de uma barra sujeita a um gradiente térmico.	29
Figura 15: Máxima tensão de origem térmica, devida a uma distribuição linear e não linear de temperaturas ao longo da espessura.	30
Figura 16: Defeito de estanqueidade numa jante automóvel: rede de filme de óxidos e porosidades..	33
Figura 17: Macrorechupes visíveis através do seccionamento de uma jante automóvel.	34
Figura 18: Micrografia que indica a formação de microrechupes num puxador obtido por FCR, na STA.	35
Figura 19: Exemplo da fissuração a quente.	36
Figura 20: Poro revelado após maquinagem da face de uma jante automóvel em liga de alumínio. ...	38
Figura 21: Micrografias que revelam a presença de porosidades (com origem no elevado teor em hidrogénio) numa jante automóvel em liga de alumínio.....	38
Figura 22: Solubilidade do hidrogénio no alumínio em função da temperatura do alumínio e respetivo estado.....	49
Figura 23: Porosidade em função do conteúdo em hidrogénio para o alumínio e algumas das suas ligas (à esquerda); Efeito do conteúdo em hidrogénio na tensão de rotura para diversas ligas de alumínio (à direita).	50
Figura 24: Representação simbólica do mecanismo de desgaseificação.....	51
Figura 25: Princípio de funcionamento de um desgaseificador mecânico rotativo com pormenor da coluna e rotor.....	52
Figura 26: Remoção do hidrogénio em função do diâmetro das bolhas para duas concentrações diferentes de gás.	53
Figura 27: Puxador obtido por FCR com posterior anodização (à esquerda); Puxador obtido por FI (sem tratamento superficial), ambos produtos de fundição da STA.	54
Figura 28: Influência da espessura da camada anodizada, na resistência à corrosão em três ambientes distintos, ao final de 8 anos, em ligas de alumínio.	56
Figura 29: Princípio de funcionamento da colmatção: Poro colmado e poro não colmatado.....	60

Figura 30: Localização da liga AlMg4Zn no diagrama de equilíbrio de uma liga Al-Mg.	64
Figura 31: Filtro de espuma SIVEX-FC da FOSECO.	70
Figura 32: Aproximação da geometria de um cilindro oco de parede fina segundo os métodos MEF e MDF.....	72
Figura 33: Imagem virtual do prato da coquilhadora para consideração dos atravancamentos existentes (à esquerda) e cotas existentes entre guias (à direita).	78
Figura 34: Excerto do desenho 2D de uma coquilha pré-existente na STA para FCR: distância entre os dois machos que fazem parte do mesmo sistema hidráulico de movimentação dos mesmos (à esquerda); Modelação 3D do sistema de movimentação de machos (à direita).	79
Figura 35: Tubo de enchimento cerâmico que será utilizado neste projeto (à esquerda), e pré-aquecimento de um tubo de enchimento em ferro fundido através de maçaricos (à direita).	81
Figura 36: Desenho do puxador com a identificação das duas principais regiões: a quadra e o manípulo.	82
Figura 37: Desenho 2D do layout 1 realizado no software AutoCAD 2014.	82
Figura 38: Possível queda de metal na utilização da solução do layout 1.	83
Figura 39: Desenho 2D do layout 2 realizado no software AutoCAD 2014.	84
Figura 40: Desenho 2D do layout 3 realizado no software AutoCAD 2014.	85
Figura 41: Desenho 2D do layout 4 realizado no software AutoCAD 2014.	86
Figura 42: Desenho 2D do layout 5 realizado no software AutoCAD 2014.	86
Figura 43: Desenho 2D do layout 6 realizado no software AutoCAD 2014.	87
Figura 44: Composição da liga AG4Z estabelecida no ProCAST.	89
Figura 45: Parâmetros térmicos da liga AlMg4Zn, estabelecidos no ProCAST.	90
Figura 46: Coeficiente de transferência de calor.	91
Figura 47: Dimensões iniciais da coquilha para a primeira simulação no ProCAST.	92
Figura 48: Volume e área superficial calculados no SolidWorks.	93
Figura 49: Geometria dos ataques adotada neste projeto (à esquerda) e geometria real dos ataques numa peça obtida por FCR (à direita).	95
Figura 50: Cálculo do volume total da gitagem e alimentação e representação da cota de enchimento.	96
Figura 51: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 1, realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.	97
Figura 52: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 1, realizada no ProCAST: tempo de solidificação.	98
Figura 53: Volume total da gitagem e alimentação + peças, calculado no SolidWorks.	99
Figura 54: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 2, realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.	100
Figura 55: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 2, realizada no ProCAST: tempo de solidificação.	101
Figura 56: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 3, realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.	103
Figura 57: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 3, realizada no ProCAST: tempo de solidificação.	103
Figura 58: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 4, realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.	105
Figura 59: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 4, realizada no ProCAST: tempo de solidificação.	106
Figura 60: Representação do sistema de gitagem e alimentação do conjunto na orientação original e na orientação com rotação de 180°.	107

Figura 61: Desenho representativo do funcionamento do conjunto nas duas posições (original e com rotação de 180°).....	108
Figura 62: Representação da cota de enchimento na orientação rodada.....	108
Figura 63: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 2, orientação rodada. Simulação realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.	109
Figura 64: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 3, orientação rodada. Simulação realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.	110
Figura 65: Resultados da simulação numérica de enchimento com a coquilha na orientação rodada: velocidades registadas durante o enchimento (fases I, II, III e IV).....	111
Figura 66: Resultados da simulação numérica de enchimento com a coquilha na orientação rodada: velocidades registadas no enchimento (fases V, VI e VII).....	112
Figura 67: Resultados da simulação numérica de enchimento com a coquilha na orientação original: velocidades registadas no enchimento (fases I, II, III e IV).	113
Figura 68: Resultados da simulação numérica de enchimento com a coquilha na orientação original: velocidades registadas no enchimento (fases V, VI, VII e VIII).....	114
Figura 69: Forno de resistência elétrica existente nas instalações do INEGI para adaptação da coquilhadora no seu topo (à esquerda), e coquilhadora (à direita).	116
Figura 70: Sistema de transmissão de movimento do tipo came.....	117
Figura 71: Vista global da modelação 3D do primeiro conceito gerado: sistema de elevação através de um sistema do tipo came.	118
Figura 72: Modelação 3D do primeiro conceito gerado: vista pormenorizada da came.....	118
Figura 73: Dois exemplos de unidades de FCBP com atuação hidráulica no topo.....	119
Figura 74: Vista geral da modelação 3D realizada em SolidWorks.	120
Figura 75: Movimento de descida e subida da coquilhadora (modelação em SolidWorks).	121
Figura 76: Abertura e fecho da coquilha através do movimento do prato móvel (modelação em SolidWorks).	122
Figura 77: Modelação 3D da base de suporte em estrutura soldada: perfil de secção quadrado (150x150x8 mm).	123
Figura 78: Conjunto: base + guias + placa de topo (modelação 3D em SolidWorks).....	123
Figura 79: Componentes do conjunto interior com movimento solidário com a placa móvel.....	124
Figura 80: Abertura na zona central da placa móvel e respetivas folgas em relação ao sistema de movimentação dos machos.....	125
Figura 81: Folga entre o sistema de movimentação de machos e o braço de elevação da placa móvel.	126
Figura 82: Relação entre as dimensões da estrutura e as dimensões de um homem de estatura média.	127
Figura 83: Inclusão de um estrado amovível para a redução da cota vertical entre o chão e a coquilha.	128
Figura 84: Representação das condições de fixação exterior da estrutura, estabelecidas no SolidWorks 2013.	129
Figura 85: Parâmetros da malha gerada no SolidWorks 2013.	130
Figura 86: Representação da estrutura final depois de gerada a malha tridimensional, com aplicação de duas cargas equivalentes (a roxo).	131
Figura 87: Vista global da distribuição de tensões na parte superior da estrutura, com as três zonas que registam a tensão mais elevada ("A", "B" e "C").	132
Figura 88: Vista global do campo de deformações da estrutura.	133

Índice de Tabelas

Tabela 1: Comparação entre o FCBP, FCG, FI em termos de porosidade média, em peças com geometrias idênticas obtidas pelos três processos (FCBP: liga AlSi10Mg; FCG: liga AlSi13; FI: liga AlSi12).	15
Tabela 2: Durezas medidas nas zonas Z1 e Z3 nas peças obtidas pelos diferentes processos.	16
Tabela 3: Materiais recomendados para moldações permanentes.	21
Tabela 4: Elementos principais presentes na composição dos aços de ferramenta para trabalho a quente: Vidar Superior e Orvar Supreme, da família dos aços AISI H11 Premium e AISI H13 Premium, respetivamente.	22
Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas dos aços Vidar Superior e Orvar Supreme, da família dos aços AISI H11 e AISI H13, respetivamente.....	22
Tabela 6: Temperatura de trabalho e vida aproximada das coquilhas, em função da liga vazada.	23
Tabela 7: Propriedades relevantes para a fundição de alumínio e de outros metais.....	36
Tabela 8: Propriedades do alumínio puro (99.99%) a 25 °C.	41
Tabela 9: Interpretação do primeiro dígito na designação do alumínio e suas ligas.	43
Tabela 10: Teores (em cm ³ /100gr) de diversos gases presentes em provetes de alumínio.	47
Tabela 11: Classes de espessuras dos revestimentos de anodização.....	57
Tabela 12: Comparação dos resultados da anodização e anodização + coloração de diferentes ligas usadas em fundição.....	58
Tabela 13: Potenciais eletroquímicos de vários metais de utilização comum em relação a um elétrodo de referência.	59
Tabela 14: Potencias eletroquímicos de ligas de fundição em alumínio de diferentes séries (S – areia; P – permanente).....	59
Tabela 15: Composição da liga AlMg4Zn em termos de elementos de liga.	63
Tabela 16: Propriedades mecânicas e físicas da liga AlMg4Zn.	64
Tabela 17: Valores de coeficientes de segurança k.	68
Tabela 18: Módulos dos alimentadores na gitagem número 1.	94
Tabela 19: Módulos dos alimentadores na gitagem número 2.	99
Tabela 20: Módulos dos alimentadores na gitagem número 4.	104
Tabela 21: Síntese dos parâmetros de especificação finais (gitagem e alimentação nº 3).	106

Lista de Abreviaturas

CAD 3D – *Computed Aided Design 3D*

CAE – *Computer Aided Engineering*

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica

DEMEGI – Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

FCBP – Fundição em Coquilha por Baixa pressão (designação portuguesa) ou LPDC – *Low Pressure Die Casting* (designação inglesa)

FCG - Fundição em coquilha por gravidade (designação portuguesa) ou GDC – *Gravity Die Casting* (designação inglesa)

FCR – Fundição em coquilha rotativa (designação portuguesa) ou TC – *Tilt Casting* (designação inglesa)

FI – Fundição Injetada (designação portuguesa) ou HPDC - *High Pressure Die Casting* (designação inglesa)

INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

MDF – Método das Diferenças Finitas

MEF – Método de Elementos Finitos

PLC – *Programmable logic controller*

STA – Sociedade Transformadora de Alumínios, SA

1. Introdução Geral

1.1 Introdução

Este trabalho faz parte da disciplina de Dissertação do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e insere-se como projeto final de conclusão do mestrado. Foi realizado na empresa, INEGI, durante 4 meses e meio, com a colaboração da empresa, STA. Aborda a temática do processo fundição em coquilha por baixa pressão, e diversos tópicos inerentes a este tema.

1.2 Apresentação das Empresas

Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI)

O INEGI é uma instituição de interface entre a Universidade e a Indústria, vocacionada para a realização de Atividade de Inovação e Transferência de Tecnologia orientada para o tecido industrial. Nasceu em 1986 no seio do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Mantém ainda hoje a insubstituível ligação ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), que constitui uma das principais fontes de conhecimento e competências científicas e tecnológicas. Ao longo dos seus mais de 20 anos de existência desenvolveu e consolidou uma posição de parceiro da indústria em projetos de I&D, sendo que presentemente cerca de 60% da sua atividade resulta de projetos com empresas.

Com a figura jurídica de Associação Privada sem Fins Lucrativos e com estatuto de «Utilidade Pública», assume-se como um agente ativo no desenvolvimento do tecido industrial Português e na transformação do modelo competitivo da indústria nacional.

Sendo uma instituição de referência a nível nacional, e um elemento relevante do Sistema Científico e Tecnológico Europeu, a missão do INEGI assenta na contribuição para o aumento da competitividade da indústria nacional através da investigação e desenvolvimento, formação nas áreas de conceção de projeto, materiais, produção, energia, gestão industrial e ambiente.

O INEGI possui um vasto conjunto de meios para suportar a sua atividade, nomeadamente laboratórios destinados à realização de trabalho experimental, oficinas para desenvolvimento de componentes e pré-séries, e um vasto conjunto de ferramentas informáticas de suporte ao trabalho de engenharia, como ferramentas CAD 3D (Computer Aided Design), CAE (Computer Aided Engineering), ferramentas de simulação estrutural, ABAQUS, simulação de processos de fundição, conformação plástica, entre outros.

A política de qualidade do INEGI assenta em promover a melhoria contínua do desempenho da Organização na concretização dos seus objetivos estratégicos e operacionais, procurando permanentemente elevar o nível de satisfação de todas as partes interessadas, assumindo o Sistema de Gestão de Qualidade como um instrumento essencial a esse desiderato.

Sociedade Transformadora de Alumínios (STA)

A STA – Sociedade Transformadora de Alumínios, SA, constituída em 1989 em parceria com o grupo belga Sobinco, é uma empresa especializada no desenvolvimento e produção de sistemas para portas e janelas, com especial foco para caixilharias de alumínio. A STA é certificada segundo a norma ISO 9001:200 desde 2006, definindo-se esta empresa como referência em termos de Tecnologia, Inovação, Design, Qualidade e Durabilidade, contando com a colaboração de 155 profissionais qualificados.

Por sua vez, a Sobinco, fundada em 1961, apresenta uma atividade semelhante à da STA, com a particularidade de desenvolver soluções direcionadas para as necessidades das empresas extrusoras e gamistas. Esta empresa possui um grande prestígio internacional, sendo líder europeia na sua área de intervenção. Emprega cerca de 350 profissionais e exporta para 60 países, localizados em 5 continentes.

A unidade fabril da STA localiza-se na cidade da Maia, e está equipada com tecnologia que permite a produção de ferragens por fundição injetada de alumínio e ZAMAK, fundição por gravidade, fundição por coquilhas rotativas, conformação de aço inoxidável, polimento, termolacagem em pó, anodização, pintura líquida, montagem e expedição.

1.3 Enquadramento e Objetivos

Esta dissertação surge devido ao interesse da empresa STA, na procura de novas alternativas aos processos de fundição já existentes na empresa, e consiste no desenvolvimento do processo de fundição em coquilha de ligas de alumínio por baixa pressão, para a materialização de produtos de fundição com propriedades mecânicas de excelência e com um menor número de defeitos comparativamente a outros processos de fundição em moldações permanentes já existentes na empresa: fundição por gravidade, fundição por coquilha rotativa e fundição injetada.

Este projeto insere-se na sequência de um longo percurso de colaboração entre o INEGI e a STA, com diversos projetos realizados ao longo dos últimos anos. Através do historial anteriormente referido foi possível adquirir um importante *know-how*, que servirá de apoio a algumas das decisões tomadas ao longo desta dissertação. Para o cumprimento dos objetivos que serão delineados, este trabalho contou com a importante cooperação de uma equipa de engenheiros de I&D do INEGI, colaboradores da referida instituição.

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento do processo de fundição por baixa pressão para a obtenção de puxadores de portas de elevadas exigências estéticas em ligas de alumínio, e poderá ser dividido em dois tópicos distintos:

- Projeto de uma coquilha para vazamento de uma liga de alumínio pelo processo de fundição por baixa pressão;
- Projeto de uma estrutura de adaptação de um forno pré-existente no INEGI, a uma coquilhadora pré-existente na STA.

1.4 Estrutura do Relatório

Este trabalho encontra-se dividido em 4 capítulos que descrevem de forma detalhada o trabalho teórico e experimental desenvolvido. O primeiro capítulo introduz o tema da dissertação, apresenta os principais objetivos e a contextualização deste trabalho.

Capítulo 2: Estado da arte

Neste capítulo é realizada a introdução ao processo de fundição em coquilha por baixa pressão, descrevendo detalhadamente o processo, os parâmetros mais relevantes no seu controlo, vantagens e desvantagens da sua utilização e a comparação com outros processos de fundição em moldações permanentes. Devido à contextualização da fundição em coquilha por baixa pressão como um processo de fundição em moldações permanentes, é realizado o estudo dos materiais de fabrico deste tipo de moldações, as ligas mais vazadas assim como a influência da temperatura de vazamento e da temperatura da moldação metálica na qualidade final dos fundidos e na vida útil da ferramenta. Abordou-se ainda a temática dos revestimentos e realizou-se o estudo das tensões de origem térmica em moldações permanentes assim como defeitos típicos da fundição neste tipo de moldações.

Sendo esta dissertação focada na fundição de ligas de alumínio, caracterizaram-se convenientemente as propriedades deste metal (e das suas ligas) e abordaram-se alguns problemas relacionados com a sua fusão e vazamento, nomeadamente a tendência para a oxidação e a influência do hidrogénio dissolvido na liga, que poderão comprometer a qualidade final das peças fundidas. É dedicada especificamente uma secção para a caracterização da liga de alumínio que será utilizada na fundição dos puxadores assim como uma secção referente a acabamentos das peças, nomeadamente a anodização, tratamento superficial a que os puxadores serão sujeitos.

No fim do capítulo faz-se uma abordagem à temática do dimensionamento de sistemas de gitagem e alimentação e destaca-se a grande importância da simulação numérica computacional no apoio à tomada de decisão, com foco na importância da sua utilização na indústria de fundição.

Capítulo 3: Trabalho Experimental

Neste capítulo descreve-se o trabalho experimental desenvolvido ao longo desta dissertação. Na primeira parte, é apresentado o projeto de uma coquilha para fundição por baixa pressão de puxadores na liga de alumínio anteriormente referida, incluindo a escolha de um *layout* para a cavidade da ferramenta e os respetivos princípios de conceito no dimensionamento dos sistemas de gitagem e alimentação. Apresentam-se as simulações numéricas de solidificação e enchimento, que permitem a validação e a otimização dos princípios de conceito anteriormente referidos.

Na segunda parte deste capítulo é feita a exposição do conceito de uma estrutura de adaptação de uma coquilhadora a um forno pré-existente no INEGI, como parte integrante da construção de uma unidade de fundição em coquilha por baixa pressão. Apresenta-se o princípio de funcionamento da máquina, a metodologia seguida para o seu desenvolvimento e a respetiva simulação estrutural do conjunto.

Capítulo 4: Conclusões e trabalhos futuros

Apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido assim como diversas propostas para trabalhos de desenvolvimento futuro.

2. Estado da arte

2.1 Introdução

As grandes vantagens associadas ao uso de ligas de alumínio (baixo peso, boas propriedades mecânicas, boa resistência à corrosão, etc.) constituem uma força impulsionadora para a introdução e desenvolvimento de novas aplicações, assim como novos processos de produção. Diversos processos ‘competem’ entre si na produção de peças fundidas em ligas de alumínio, sendo uma área de grande interesse não só para aplicações na indústria automóvel, um dos principais setores impulsionadores da utilização das ligas de alumínio, mas também em diversas outras aplicações, em indústrias com pouca ou nenhuma relação com o setor automóvel.

Dentro dos processos de fundição mais em voga, a fundição em coquilha por baixa pressão (FCBP), também denominado de Low Pressure Die Casting (LPDC), é com certeza um processo a ter em conta graças às suas particularidades, permitindo em grande parte dos casos um excelente compromisso entre qualidade, custo, produtividade e complexidade geométrica. Mesmo sendo um processo com alguma antiguidade (a primeira patente foi registada em Inglaterra em 1910), a sua aplicação industrial em grande escala foi essencialmente feita nas últimas 3 a 4 décadas. Foi inicialmente desenvolvido como alternativa ao processo de fundição por gravidade, de modo a corrigir alguns problemas que estão diretamente relacionados com o vazamento manual do metal líquido, nomeadamente a minimização de defeitos e o aumento da produtividade e reprodutibilidade inerentes ao processo.

Atualmente, a FCBP é maioritariamente adotada para a produção de componentes em ligas de alumínio e magnésio, constituindo um dos principais processos utilizados para a produção de peças com elevadas exigências mecânicas, como jantes de automóveis (Botter 2005).

2.2 Processo de fundição em coquilha por baixa pressão (FCBP)

2.2.1 Introdução

De acordo com (Adeoye 2011; Butler 2001), a fundição em coquilha por baixa pressão (FCBP) é um processo de fundição *near net shape* que faz uso de moldações permanentes que são enchidas de baixo para cima, com metal líquido a baixa pressão (tipicamente entre 0,5 MPa e 7 MPa) e com velocidades reduzidas, permitindo controlar finamente o problema da turbulência no vazamento. Através da FCBP é possível um enchimento muito preciso e controlado das peças, promovendo a produção de fundidos de elevada qualidade e com ótimas propriedades mecânicas.

Na Figura 1, estão simplificadaamente representados alguns dos principais componentes do processo de fundição em coquilha por baixa pressão.

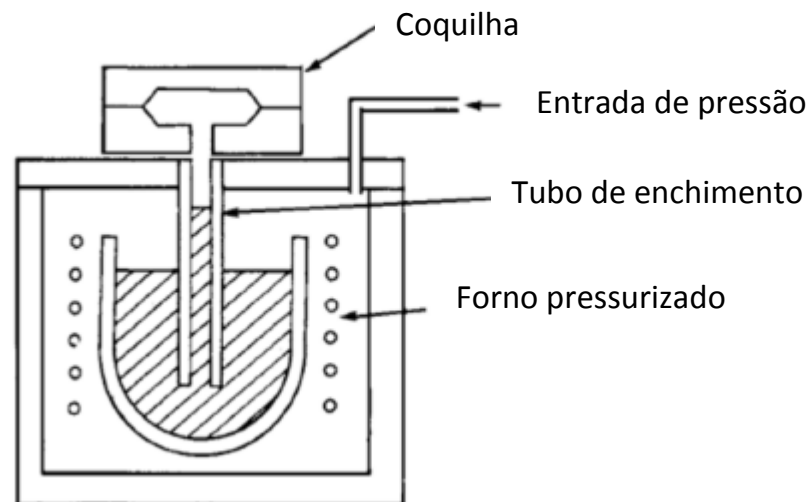


Figura 1: Representação esquemática dos diversos componentes envolvidos no processo de fundição por baixa pressão (Brown 1999).

2.2.2 Descrição do processo

Na fundição em coquilha por baixa pressão o metal fundido é colocado num cadinho que se encontra no interior de um forno. O forno situa-se no interior de uma câmara pressurizada e devidamente selada, garantindo que todo o cadinho que contém o metal líquido se encontra sob pressão. Um tubo de enchimento liga o forno à coquilha, permitindo a subida do metal aquando da aplicação de pressão na superfície do banho de metal. A cavidade da coquilha, com a forma da peça a obter, recebe o metal fundido e através da transferência de calor entre o metal e a ferramenta, ocorre a solidificação do metal. A pressão é mantida até que a peça solidifique, sendo posteriormente relaxada, voltando o excesso de metal líquido novamente para o forno. O último passo consiste na abertura da coquilha e extração do fundido.

Uma das vantagens mais evidentes da FCBP é a enorme capacidade no controlo do enchimento das peças, ao contrário de outros processos de fundição, nomeadamente a fundição em coquilha por gravidade assim como a Fundição Injetada (FI). Deste modo, a caracterização do modo como é realizado o enchimento das peças é de grande relevância.

O controlo da velocidade de enchimento das peças é feito através do controlo da taxa a que a pressão é exercida. Por conseguinte, é possível realizar “vazamentos” com muito baixa ou até sem turbulência. Para a grande maioria dos produtos, à medida que é feito o enchimento, e dependendo da secção, a taxa de aplicação da pressão é intencionalmente variada para garantir condições ótimas de enchimento. Naturalmente, esta possibilidade depende em grande parte da sofisticação da respetiva unidade de fundição. A variação da taxa a que é aplicada a pressão pode ser identificada na Figura 2 (Butler 2001; Kurtz 2007; Guofa et al. 2008).

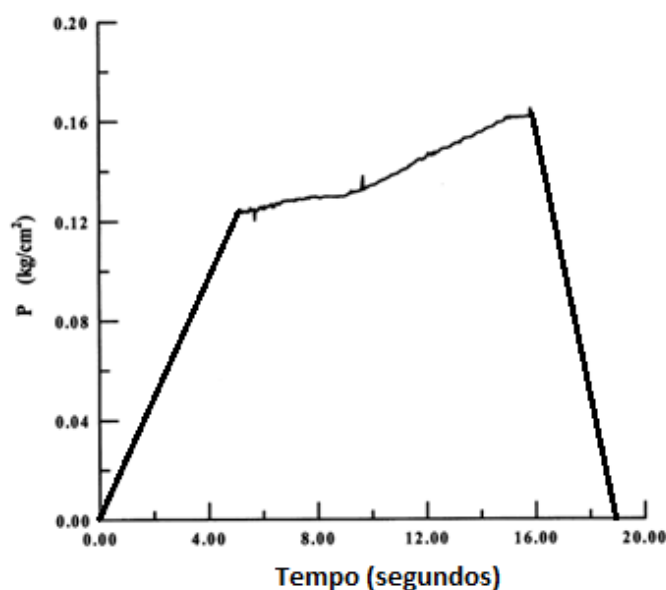


Figura 2: Curva pressão-tempo (P-t) para o enchimento de uma jante automóvel através da FCBP. Adaptado de (Jer-Haur, Feng-Lin, e Weng-Sing 2001)

De acordo com (Jer-Haur, Feng-Lin, e Weng-Sing 2001; Guofa et al. 2008), e a partir da análise da Figura 2, claramente é possível subdividir o enchimento em três momentos distintos:

- **1ª Etapa**

Apresenta uma evolução linear da pressão, correspondente ao primeiro momento em que esta é exercida, obrigando o metal a subir pelo tubo de enchimento. Nesta fase, a pressão mínima requerida para forçar o metal a subir pode ser calculada facilmente através da Lei de Pascal, onde $P = \rho g H$ (“P” representa a pressão hidrostática, “ ρ ” a massa volúmica do metal, “g” a aceleração gravítica e “H” a altura). É importante destacar que de peça para peça, a altura “H” decresce já que a altura do metal no cadinho diminui, diminuição esta tanto maior quanto maior o volume de cada peça. Assim sendo, em teoria, a altura “H” deveria ser medida antes da produção de cada peça. Na prática, como o metal é forçado a subir devido ao aumento da

taxa a que é aplicada a pressão, e não devido à pressão absoluta, esta pequena variação da altura H é irrelevante.

Na primeira fase, a velocidade de enchimento deverá ser o mais alta possível desde que o escoamento não seja turbulento, de modo a minimizar o aprisionamento de ar. É sabido que um escoamento num tubo é considerado laminar quando o número de Reynolds, " Re ", é inferior a 2100 ($Re = D * v * \rho / \mu$, onde " D " representa o diâmetro da secção, " v " a velocidade, " ρ " a massa volúmica e " μ " a viscosidade dinâmica do fluído). De qualquer modo, não existe a necessidade de que o regime seja necessariamente laminar, bastando apenas que este não seja turbulento. Secundariamente, o critério utilizado para o estabelecimento de um limite para um " Re " laminar igual a 2100, é geralmente considerado para tubos horizontais, ao contrário da orientação vertical típica da baixa pressão. Através da experiência industrial, é considerada uma boa prática que o enchimento de um tubo com 500 mm de comprimento e 90 mm de diâmetro se dê em aproximadamente 5 segundos. Ou seja, a velocidade de enchimento será cerca de 10 cm/s, a que corresponde um " Re " tão elevado como 21 000.

- **2ª Etapa**

O segundo momento, identificável na Figura 2 para um tempo decorrido de aproximadamente 5 segundos, corresponde ao instante em que é iniciada a pressurização adicional que força o metal a entrar na cavidade da coquilha. Esta fase é crítica, na medida em que é necessário um enchimento sem turbulência, com a velocidade e sequência de enchimento apropriada, de modo a minimizar o gás aprisionado mas sem sacrificar a produtividade. A pressão requerida durante esta fase não poderá ser obtida do modo análogo à primeira fase de enchimento, sendo relativamente complexa a sua obtenção. Esta grande complexidade associada tem geralmente uma forte relação com a geometria das peças, na medida em que a velocidade de enchimento deverá ser adequada à secção correspondente da peça. De modo a que o enchimento se dê de forma suave, a velocidade de enchimento deverá ser, teoricamente, a mais baixa possível. Na prática, para velocidades de enchimento relativamente baixas, menos produtivo será o processo e poderá haver tendência a ocorrer uma solidificação prematura da liga, resultando possivelmente na rejeição do fundido. Devido a esta grande dificuldade, e dependendo da geometria da peça, os parâmetros de enchimento deverão ser determinados pelo engenheiro, onde a utilização de *softwares* de simulação numérica de enchimento desempenha um importante papel. A grande importância da simulação numérica é facilmente comprovada pela grande quantidade de artigos científicos desenvolvidos nesta área de estudo (Jer-Haur, Feng-Lin, e Weng-Sing 2001; Guofa et al. 2008).

Os diferentes *softwares* de simulação numérica, as suas particularidades, e a sua grande utilidade na fundição, serão abordados na secção 2.6.2 desta dissertação.

- **3ª Etapa**

A terceira etapa corresponde ao relaxamento da pressão, que promove o retorno do metal em excesso para o forno.

Segundo (Adeoye 2011; Butler 2001), este modo de enchimento típico da FCBP confere a este processo uma série de vantagens, nomeadamente o elevado rendimento do processo, a

minimização de defeitos e a obtenção de produtos de fundição *near net shape*. Estes atributos asseguraram a crescente importância desta tecnologia, especialmente em aplicações com requisitos *premium*, como jantes de automóveis, coletores de gases de motores, cabeças de cilindro, cárteres, entre outros. A produção deste tipo de peças torna-se natural devido ao seu elevado tamanho, complexidade e volume, que devido às características únicas inerentes a esta tecnologia, o tornam uma opção bastante atrativa. É, deste modo natural, a atual expansão da utilização deste processo de fundição para a produção de componentes em setores da indústria bastante díspares da indústria automóvel, principal impulsionadora desta tecnologia.

2.2.3 Soluções construtivas e parâmetros mais importantes no controlo do processo

De acordo com (Brown 1999), na FCBP normalmente podem ser utilizados dois tipos de coquilhas:

- Coquilha constituída por uma parte fixa e uma parte móvel, estando a placa fixa situada na zona inferior da coquilhadora, diretamente por cima da tampa do forno, deslocando-se a parte móvel verticalmente em relação a esta. Este tipo de solução construtiva está representada na Figura 3.

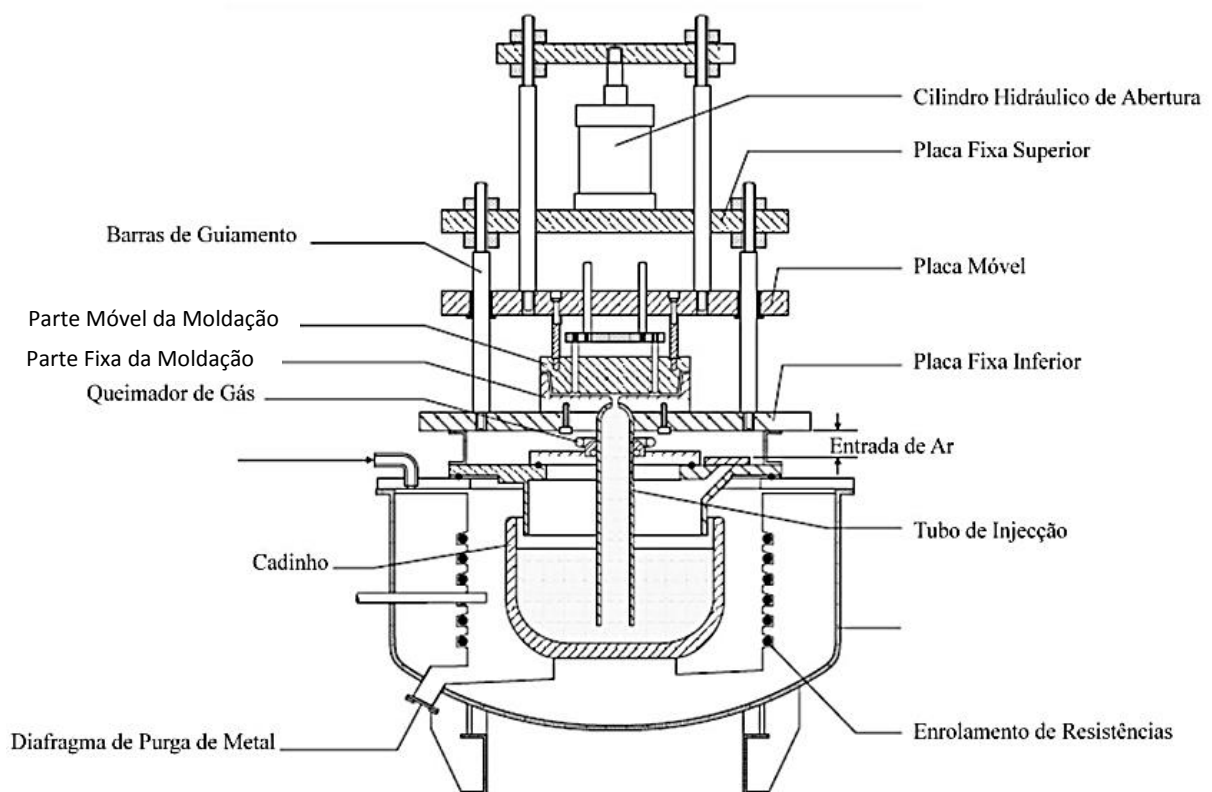


Figura 3: Componentes típicos de um sistema de baixa pressão, com meia moldação fixa (Marques 2010).

- Coquilhas completamente amovíveis: nesta solução, a ferramenta é fechada num local próximo do forno, sendo posteriormente posicionada por cima do tubo de enchimento, que liga a ferramenta ao banho de metal líquido. Depois do enchimento e da solidificação, a coquilha é retirada para uma zona próxima da máquina, onde é feita a remoção da peça. Nesta fase, o topo do tubo de enchimento encontra-se exposto ao ar. No enchimento, a vedação entre a coquilha e o tubo de enchimento é geralmente garantida através de um assento axial cónico (sistema macho-fêmea). A solução construtiva que passa pela utilização de moldações completamente amovíveis com acoplamento cónico é adotada na empresa CIFIAL, por exemplo, para o fabrico de torneiras em ligas de cobre, sendo feita a sua representação na Figura 4.

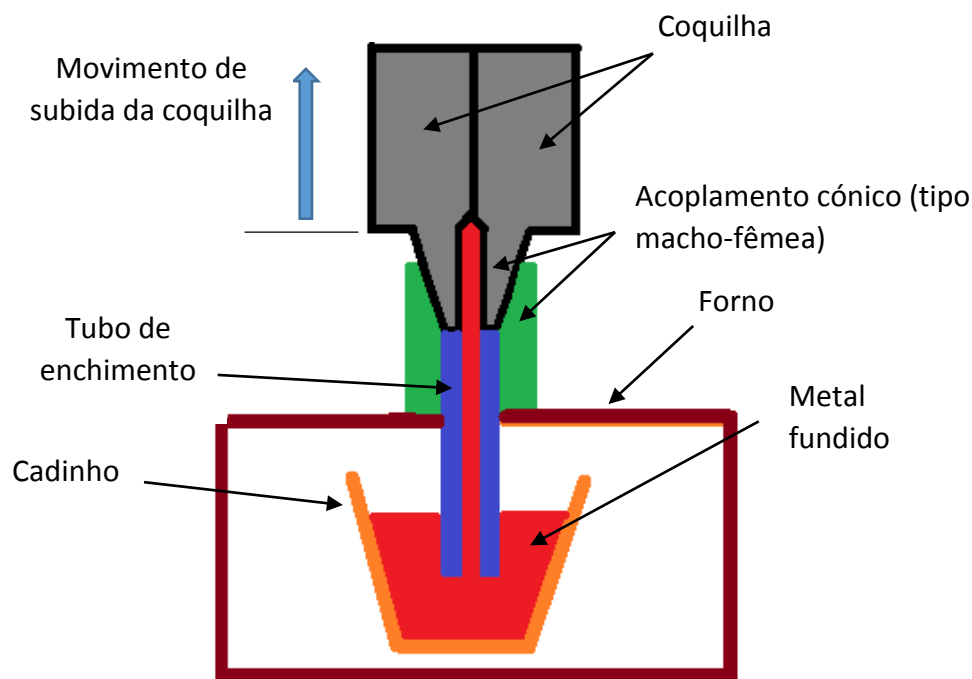


Figura 4: Componentes típicos de um sistema de FCBP, com ferramenta completamente amovível (representação da coquilha na posição de enchimento).

Segundo (Adeoye 2011; Butler 2001; Kurtz 2007; Engineering 2013), o equipamento inerente a este processo, aquando de um elevado grau de sofisticação, pode requerer um elevado investimento, principalmente em sistemas de controlo de pressão e vácuo. A utilização de PLC's (*Programmable Logic Controller's*) permite a programação de determinados parâmetros do processo através da definição dos mesmos pelo utilizador. Assim, é possível uma elevada reprodutibilidade das características das peças, na medida em que após uma pré-série onde se realiza o ajuste dos parâmetros do processo, é possível que a máquina opere praticamente sem necessidade de intervenção humana, estando o controlo do processo assegurado pelos programadores lógicos. É importante referir que a utilização de PLC's permite que os valores dos parâmetros do processo sejam armazenados, aumentando assim a flexibilidade de fabrico de diferentes produtos, eventualmente em ligas distintas, sem prejuízo para os produtos de fundição e com tempos mais curtos de *setup* das máquinas.

Os elevados custos associados à automatização do processo são geralmente amortizados através do elevado valor acrescentado destes produtos de fundição, regra geral devido à sua elevada qualidade e complexidade, assim como as elevadas taxas de produção que poderão ser adotadas. Embora o investimento seja oneroso, é contudo bastante inferior ao investimento necessário para a FI.

De acordo com (Melo 2014), de todos os parâmetros envolvidos, é possível destacar aqueles que revelam ter uma maior importância no controlo da FCBP:

- Material de fabrico da coquilha;
- Temperatura da coquilha;
- Temperatura de vazamento da liga;
- Velocidade de enchimento;
- Tempo de solidificação;
- Revestimento da coquilha;
- Cadência de produção.

Segundo (Brown 1999), na FCBP as cadências de produção dependem de diversos fatores, sendo que os mais importantes são:

- Tamanho e volume das peças fundidas;
- Liga vazada;
- Grau de automatização do processo;
- Qualidade final pretendida.

Na produção de diferentes produtos no mesmo equipamento de FCBP, poderá haver uma grande discrepância nas cadências de produção envolvidas. Estas discrepâncias são essencialmente função dos fatores anteriormente descritos. A título de exemplo, para a produção de peças de elevada dimensão em ligas alumínio, como jantes automóveis, é habitual o registo de cadências de produção na ordem de 10 ciclos por hora, enquanto que para peças de pequena dimensão em ligas de cobre, como por exemplo torneiras, é comum a obtenção de cadências próximas de 40 ciclos por hora, aproximadamente 4 vezes superior ao caso anterior.

Na Figura 5 é apresentada uma unidade de fundição por baixa pressão da marca INDUGA, em tudo bastante similar à unidade utilizada na CIFIAL, essencialmente para vazamento de ligas de cobre em moldações metálicas de cobre-berílio. De acordo com (INDUGA 2013), esta unidade tem um elevado grau de automatização, possuindo um forno e um manipulador robótico automático. Possui também um sistema de alimentação automático do forno, assim como de refrigeração e revestimento da coquilha. Com um tempo de ciclo anunciado de aproximadamente 50 segundos, é possível obter cerca de 450 peças fundidas em cada turno de 8 horas.



Figura 5: Unidade de fundição por baixa pressão completamente automatizada, com um forno e manipulador robótico (INDUGA 2013).

2.2.4 Vantagens, desvantagens e comparação da FCBP com outros processos de fundição

Serão em seguida apresentadas as vantagens e desvantagens inerentes à FCBP. Devido à sua importância, será também realizada uma comparação entre a FCBP e outros processos de fundição em moldações permanentes. De acordo com o contexto onde se insere esta dissertação, os processos mais importantes que serão alvo desta análise comparativa são a fundição em coquilha por gravidade (FCG) e a FI.

Vantagens da FCBP (genéricas) (Butler 2001; Adeoye 2011; Marques 2010; Melo 2014):

- Excelente compromisso entre qualidade, preço, produtividade e complexidade geométrica das peças produzidas;
- O projeto dos sistemas de gitagem e alimentação é relativamente simplificado;
- Elevado rendimento do processo devido a não haver necessidade de utilizar sistemas de gitagem e alimentação muito volumosos, usuais em outros processos de fundição;
- Menor necessidade de operações posteriores de maquinagem, graças à gitagem e alimentação simplificada;
- Preenchimento de espessuras finas (não tão finas como na FI);
- Maior facilidade em se obter peças de elevado porte devido à automatização do processo (baixa penosidade para o operador);
- Peça final com poucas impurezas, devido ao facto de ser utilizado metal contido numa zona intermédia do banho, evitando impurezas decantadas ou flutuantes;

- A solidificação direcional permite um bom enchimento da moldação, apenas sendo necessário manter a pressão na câmara do forno;
- Grande versatilidade do processo quanto ao tipo de ligas que podem ser utilizadas;
- Possibilidade de utilização de machos não permanentes, geralmente em areia, permitindo a obtenção de peças com uma grande variedade de geometrias;
- Possibilidade de vazamento sob vácuo ou por contrapressão através de algumas modificações no processo (a analisar na secção 2.2.5).

Desvantagens da FCBP (genéricas) (Butler 2001; Adeoye 2011; Marques 2010; Melo 2014):

- Não é apropriada para a fundição de peças de muito pequena dimensão ou de pré-séries;
- Cadências de produção média, equiparáveis às da FCG mas bastante inferiores às cadências obtidas na FI;
- Embora mais barato do que a FI, o custo das máquinas e ferramentas é relativamente oneroso;
- São necessárias taxas de produção elevadas para amortização do custo do equipamento e das suas ferramentas;
- Possibilidade de obtenção de espessuras finas, não tão finas como na FI, contudo mais finas do que na fundição por gravidade;
- Poderá haver introdução de contaminantes no banho de metal devido ao arrasto de impurezas do tubo de enchimento, aquando do recuo do metal para o forno. Deste modo, a utilização de tubos de enchimento cerâmicos é uma prática aconselhável. O recuo do excesso de metal para o forno poderá também provocar uma certa turbulência, aquando da sua queda. Esta turbulência promove a movimentação de contaminantes no banho, que inicialmente se encontram à superfície ou no fundo do banho. Para a minimização da inclusão destes contaminantes nas peças, a utilização de filtros cerâmicos é uma prática aconselhável. A importância da utilização de filtros cerâmicos e tubos de enchimento cerâmicos será abordada nas secções 2.5.2 e 3.3 desta dissertação.

Comparação da FCBP com outros processos de fundição

Comparação da FCBP com a FI (Butler 2001; Neto 2014; Botter 2005):

- A FCBP permite a obtenção de peças com elevada resistência mecânica, elevada ductilidade e tenacidade. Assim sendo, a FCBP poderá ser adotada na produção de peças para aplicações de compromisso, com elevadas exigências mecânicas, contrariamente à FI;
- A FI permite a obtenção de espessuras mais finas devido a ser possível utilizar maiores velocidades de enchimento;
- Possibilidade de utilização de uma maior diversidade de ligas na FCBP;
- Custo dos equipamentos bastante mais baixo na FCBP;

- Menor investimento nas coquilhas para a FCBP, essencialmente devido à necessidade de coquilhas com muito menor dimensão: pressões muitíssimo inferiores à FI (1000 bar), requerendo coquilhas com menor rigidez;
- Taxas de produção bastante mais elevadas na FI;
- Possibilidade de anodização dos produtos de fundição obtidos através da FCBP, contrariamente aos obtidos pela FI.

Comparação da FCBP com a FCG (Butler 2001; Kurtz 2007; Botter 2005):

- A FCBP requer um investimento bastante superior;
- Na FCBP é possível preencher espessuras mais finas, devido à possibilidade de utilizar maiores velocidades de enchimento;
- A FCBP permite obter peças com melhores tolerâncias dimensionais;
- Contrariamente à FCG, na FCBP existe um controlo muito preciso das velocidades de enchimento, promovendo enchimentos praticamente isentos de turbulência;
- A utilização de Azoto ou Árgon para a pressurização do forno permite minimizar a formação de óxidos e a absorção de hidrogénio.
- Através da FCBP é possível obter-se um elevado grau de repetibilidade da qualidade das peças (processo automatizado) contrariamente à incerteza gerada pela ação do operador no vazamento por gravidade;
- A FCBP necessita apenas de pequenos alimentadores 'à cabeça' (*head feeders*), permitindo uma redução de metal que não faz parte da peça. É possível obter entre 5% a 20% de material não útil (em percentagem do peso da peça), bastante inferior a valores que rondam facilmente os 100% no vazamento por gravidade. A gitegem e alimentação simplificadas, quando possíveis, minimizam também as operações de corte e acabamento dos produtos de fundição, assim como a redução dos custos de refundição dos gitos e alimentadores.

Através de uma análise bastante simplificada da redução de desperdícios na FCBP, é possível uma noção mais clara da mais-valia que esta tecnologia representa. Comparando a FCBP com a FCG no vazamento de peças de elevada dimensão como jantes de automóveis, poderá ser possível a poupança de 9 kg por ciclo de vazamento, pelas razões explicitadas no tópico anterior. Para uma produção de 10000 peças/ano, é possível uma poupança de aproximadamente 90000 kg de alumínio/ano (mais perdas por fusão que rodam os 7%). Considerando um custo de fusão médio de 0,35 €/kg, isto significa uma redução global de aproximadamente 34000 €/ano, não considerando o custo associado às operações de corte, movimentação de cargas e tempo despendido pelos trabalhadores nestas tarefas (Kurtz 2007).

Mesmo que o investimento para a FCBP seja elevado, torna-se claro que o custo dos equipamentos poderá ser amortizado a curto/médio prazo, acrescido ao facto de ser possível obter peças com características superiores às obtidas pelo tradicional vazamento por gravidade, assim como cadências de produção mais elevadas. A FCG continua a ser adotada em larga escala devido ao baixo custo dos equipamentos e à maior simplicidade associada a

este processo. A escolha entre um ou outro processo poderá depender essencialmente dos requisitos dos produtos de fundição.

(Botter 2005) Realizou um estudo comparativo entre a FCBC, FCG e a FI. Esta investigação foi realizada em peças de geometria idêntica, com algumas variações na liga utilizada (adaptada ao processo de fundição em causa) e incidindo o estudo nas zonas mais representativas do fundido. Para a FCG, FI e FCBP, as ligas de alumínio utilizadas foram a AlSi13, AlSi12, AlSi10Mg, respetivamente.

O estudo incidiu a sua análise em peças de alumínio, utilizadas como tampas de *safety boxes* para transporte de diversos químicos, nomeadamente derivados do petróleo. A definição das regiões críticas que foram analisadas encontra-se representada na Figura 6.

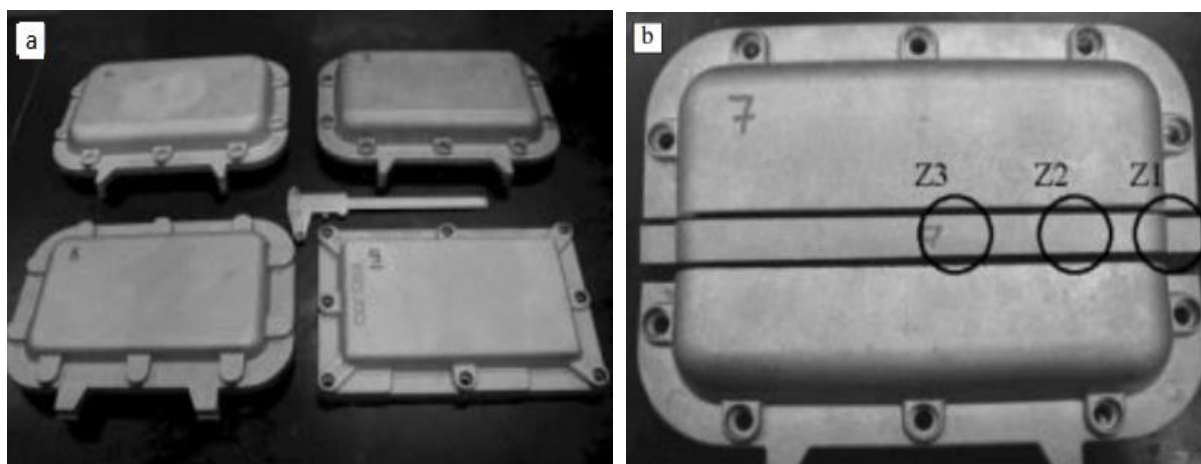


Figura 6: Peça em estudo (*safety box cover*) (a) e regiões em análise no estudo da respetiva peça (regiões Z1, Z2 e Z3) (b) (Botter 2005).

Os resultados obtidos, nomeadamente a percentagem de micro e macroporosidades, são apresentados na Tabela 1. Na Tabela 2 são apresentadas as durezas das zonas Z1 e Z3, zona mais afastada e mais próxima do canal de alimentação, respetivamente.

Tabela 1: Comparação entre o FCBP, FCG, FI em termos de porosidade média, em peças com geometrias idênticas obtidas pelos três processos (FCBP: liga AlSi10Mg; FCG: liga AlSi13; FI: liga AlSi12) (Botter 2005).

Região	Porosidade	FCBP (%)	FCG (%)	FI (%)
Z1	Micro	0.004	0.048	0.557
	Macro		0.76	1.59
	Total	0.004	0.81	2.15
Z2	Micro	0.005	0.002	0.232
	Macro		0.30	2.74
	Total	0.005	0.30	2.98
Z3	Micro	0.055	0.061	0.534
	Macro	0.500	1.80	3.24
	Total	0.560	1.86	3.78

Tabela 2: Durezas medidas nas zonas Z1 e Z3 nas peças obtidas pelos diferentes processos (Botter 2005).

Processo	Região	Dureza (HB)
FCBP	Z1	67
	Z3	67
FCG	Z1	58
	Z3	57
FI	Z1	79
	Z3	65

De acordo com o estudo realizado, a qualidade das peças obtidas através da FCG assim como pela FI, é fortemente afetada pela presença de macroporosidades em elevadas percentagens. Contrariamente às últimas, as peças obtidas através da FCBP apresentam valores de micro e macroporosidades bastante baixos, tal como é identificável na Tabela 1. A porosidade global dos fundidos foi 0.19%, 0.99%, 2.97%, para as peças obtidas por FCBP, FCG e FI, respetivamente.

Quanto à análise de durezas, é perceptível que quanto mais afastada está a zona em análise do canal de alimentação, mais elevadas são as taxas de arrefecimento, traduzindo-se em microestruturas mais finas, logo em zonas de maior dureza. Este facto pode ser observado na Figura 7, onde a zona Z1, mais afastada da zona de alimentação da peça, possui uma microestrutura bastante mais fina, contrariamente à zona Z3, que evidencia um menor taxa de arrefecimento, dada a microestrutura mais grosseira. Os resultados dos ensaios de dureza realizados nas peças obtidas pela FCBP variam entre 63 e 67 HB (em diversas zonas incluindo a Z1 e Z2 e Z3). Estas variações são pouco significativas.

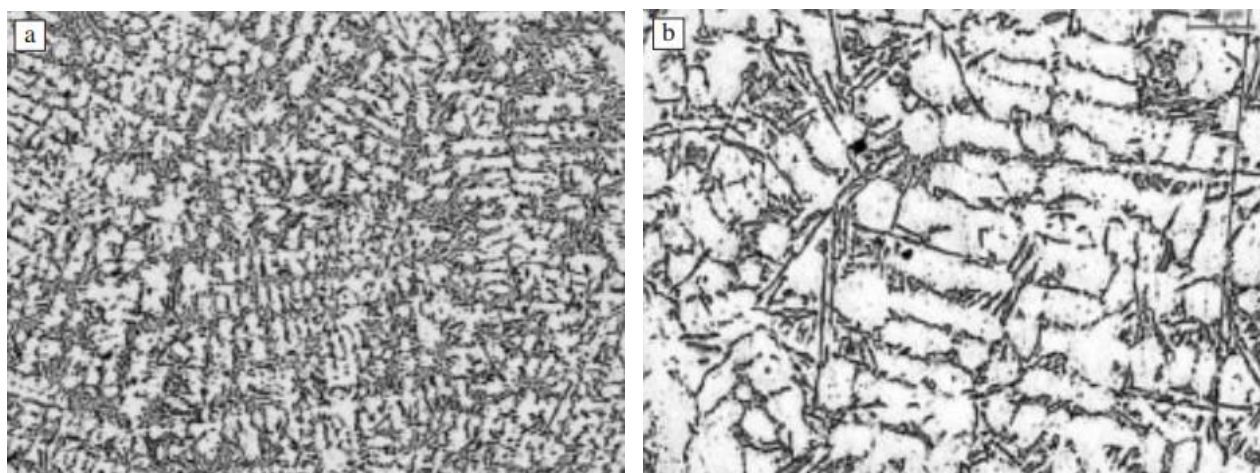


Figura 7: Microestruturas das zonas Z1 (a) e Z3 (b) da peça obtida por FCBP (Botter 2005).

É natural que para as elevadas taxas de arrefecimento tipicamente presentes na FI, sejam obtidas peças com durezas mais elevadas. Embora este facto seja verdade, há que ter em conta que o elevado teor em Silício presente na liga utilizada na FI (AlSi12), promove o aumento da dureza.

(Botter 2005) Estabelece um *ranking* comparativo de qualidade genérica das peças obtidas pelos diferentes processos de fundição em análise. Segundo este autor, este *ranking* toma a seguinte ordem: FCBP > FCG > FI. Deste modo, a FCBP permite a obtenção de fundidos com uma baixa percentagem de porosidades e com uma elevada resistência mecânica. O autor destaca ainda o elevado rendimento metalúrgico do processo, e evidencia o elevado potencial da FCBP, que poderá e deverá ser explorado nos mais diversos setores e aplicações. Este estudo vem de encontro ao que foi anteriormente dito ao longo deste capítulo, destacando a grande importância e o elevado potencial da FCBP na fundição em moldações permanentes.

2.2.5 Variantes da FCBP

Dada a forte ligação da FCBP com diversos outros processos de fundição, serão em seguida apresentadas algumas variantes da FCBP, não sendo objetivo desta dissertação a caracterização detalhada de cada processo.

Segundo (Marques 2010; Adeoye 2011), existem diversas variantes da FCBP. Numa delas, o enchimento da cavidade da coquilha não é feito através da aplicação de pressão na câmara que contém o cadinho, mas sim através da criação de vácuo na moldação, que promove o enchimento da cavidade. Este processo foi patenteado em 1972 por Hitchiner Manufacturing, e tem normalmente a designação de vazamento sob vácuo (*counter-gravity casting* ou *vacuum pressure casting*), mas é em tudo bastante similar à FCBP.

O *setup* típico do processo de *counter-gravity casting* é apresentado na Figura 8.

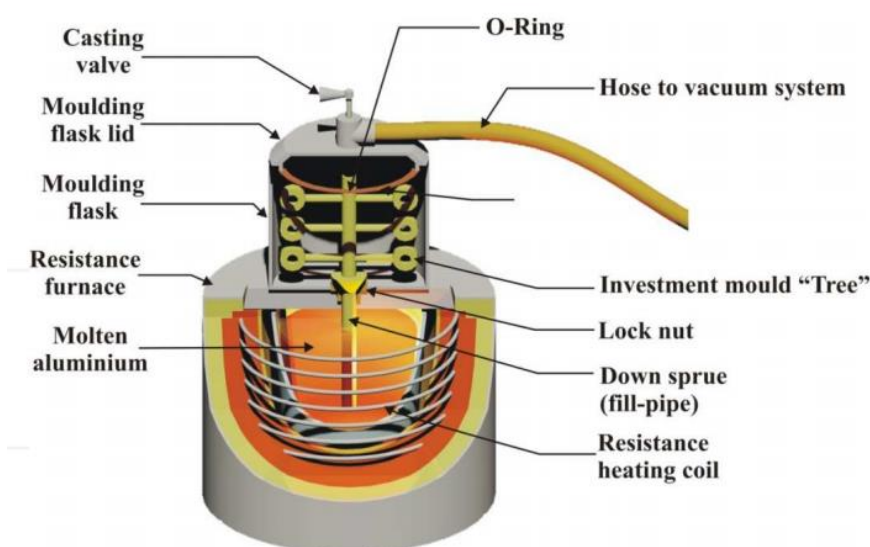


Figura 8: Setup típico de um sistema de fundição por *counter-gravity casting* (Adeoye 2011).

Uma outra variante da FCBP é a fundição por contra pressão ou *counter pressure casting*. Este processo utiliza uma combinação de pressão e contrapressão para controlar o enchimento das moldações. O processo é grosso modo idêntico à FCBP, sendo que a grande diferença reside no facto de não ser apenas o forno que se encontra pressurizado, mas existe do mesmo modo a pressurização da área do molde permanente. Deste modo, a taxa de enchimento depende da diferença entre a pressão e a contrapressão geradas, e não apenas da pressão a que o banho está sujeito (típico da FCBP) (Vijayaram 2012).

Na Figura 9, é feita uma representação dos componentes principais de uma unidade de fundição por contrapressão.

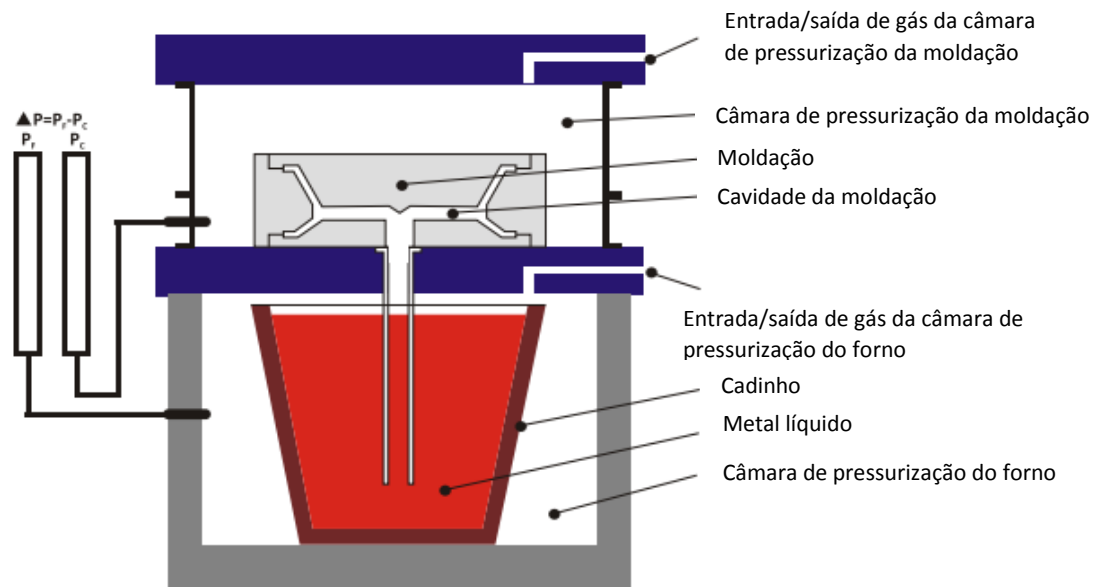


Figura 9: Representação esquemática dos componentes de uma unidade de fundição por contrapressão (Vijayaram 2012).

De acordo com (Kurtz 2007), devido à necessidade de pressurização tanto do forno como da câmara onde se encontra a ferramenta, este processo está associado a consumos de ar bastante superiores, assim como coquilhas bastante mais dispendiosas, traduzindo-se em custos acrescidos. Do mesmo modo, e devido a normativas de segurança, o investimento nas máquinas para este processo é superior ao investimento para o equipamento associado à FCBP.

A fundição por baixa pressão pode também ser aplicada a moldações de precisão em areia, e é adequada à fundição de uma grande variedade de peças, especialmente aquelas que possuem uma elevada complexidade e exigem uma elevada integridade, como por exemplo para a exigente indústria aeroespacial. A título de exemplo, impulsores, comutadores elétricos (*electrical switch gear*), blocos de motor e outros tipos de peças podem ser fundidos através da utilização de moldações em areia (Jorstad 2009).

Na Figura 10 são apresentados dois exemplos de componentes de elevada complexidade, passíveis de serem produzidos pelo processo de fundição por baixa pressão, adaptado à utilização de moldações em areia.

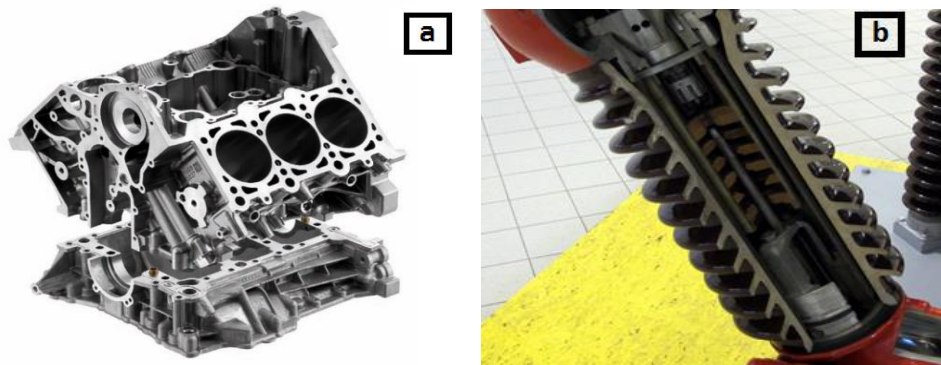


Figura 10: Bloco de motor do Audi V6 (a) e comutador elétrico (corpo exterior) (b), obtidos através da FCBP (KS Aluminium-Technologie 2013; "Switchgear" 2014).

2.3 Vazamento em moldações metálicas

2.3.1 Introdução

Quando se pretende obter séries de peças da ordem dos milhares, com bom acabamento superficial e bom rigor dimensional, adotam-se processos de fundição em moldações permanentes: FCBP, FCG, Fundição em coquilha rotativa (FCR), FI, etc (Mesquita 1971). Em qualquer dos processos anteriormente referidos, a qualidade da ferramenta (coquilha) que irá dar a forma à peça reflete-se diretamente na qualidade final das peças fundidas. Deste modo, para que a ferramenta tenha uma vida útil superior e para que sejam obtidos produtos de fundição com elevada qualidade e a custos moderados, é importante estudar as diferentes possibilidades existentes na escolha dos materiais de fabrico das coquilhas, assim como analisar as diferentes ligas passíveis de serem vazadas e os diversos parâmetros que poderão afetar a longevidade da ferramenta. Ao longo desta secção será enfatizada a temática do vazamento de ligas de alumínio em moldações metálicas.

2.3.2 Materiais utilizados no fabrico de moldações metálicas

Na escolha do material/materiais para a coquilha, deverão ser considerados os seguintes fatores (Neto 2014):

- Quantidade de peças a serem produzidas;
- Liga a ser vazada;
- Forma e espessura da peça;
- Custo do material.

De acordo com (Marques 2010), as coquilhas estão sujeitas a condições de trabalho bastante severas, principalmente em resultado das flutuações térmicas cíclicas a que estas estão sujeitas durante o ciclo de produção, agravando-se o seu impacto quanto mais elevada for a temperatura de vazamento da liga em questão.

É fundamental que as coquilhas mantenham a sua estabilidade estrutural e dimensional durante os ciclos térmicos de trabalho: transformações metalúrgicas envolvendo variações volumétricas podem implicar o empeno da ferramenta, além de que podem contribuir para a sua fissuração, reduzindo a sua vida útil.

Além das solicitações termomecânicas, as coquilhas estão também sujeitas à oxidação, à erosão provocada pela passagem da corrente líquida durante o enchimento, a reações com as escórias e à corrosão a quente em contacto com a atmosfera, água ou tintas de revestimento. Todos estes fatores deverão ser tidos em conta na escolha dos materiais das coquilhas.

Os materiais tradicionalmente empregues no fabrico de coquilhas são principalmente de três tipos (Marques 2010; Neto 2014; Kalpakjian e Schmid 2009; Melo 2014):

- Ferro Fundido Cinzento (FFC): material muito utilizado quando o número de peças a produzir é relativamente baixo;
- Aços de ferramenta para trabalho a quente: utilizados para séries elevadas ou muito elevadas de peças, denotando elevada resistência mecânica a altas temperaturas. A dureza destes aços é naturalmente elevada, e situa-se regra geral entre 354 HV a 567 HV. São aços com percentagens de carbono entre 0,30% a 0,40%, geralmente ligados ao Crómio, Molibdénio, Vanádio e Tungsténio, e permitem uma elevada resistência ao desgaste e elevada resistência à fissuração por fadiga térmica;
- Ligas de Cobre-Berílio: utilizadas quando é necessária uma condutividade térmica muito elevada, para uma maior resistência à fadiga térmica. Estas ligas são geralmente tratadas termicamente para lhes conferir elevada tensão limite elástico e boa resistência à corrosão. As ligas de cobre-berílio são bastante caras, rondando valores entre os 20€/kg a 30€/kg, motivo pelo qual apenas são utilizadas em aplicações muito específicas como no caso do vazamento de latões (para grandes séries).

A Tabela 3 contém informação referente à escolha do material da coquilha para processos de fundição em moldações permanentes, em função do tipo de liga, do número de peças a vazar e da sua dimensão.

Tabela 3: Materiais recomendados para moldações permanentes (adaptado de (Magalhães 1993)).

Liga vazada	Número de peças a vazar		
	1000	10 000	100 000
a) Para pequenas peças cuja dimensão máxima não exceda os 25 mm			
Zinco	Ferro Fundido Cinzento (FFC); Aço 1020		
Alumínio; Magnésio	FFC; Aço 1020		FFC c/insertos; AISI H13; Aço 1020
Cobre	FFC	FFC	FFC ligado
b) Para peças cuja dimensão máxima seja maior que 25 mm			
Zinco	FFC; AISI H11	FFC; AISI H11	FFC; AISI H11
Alumínio; Magnésio	FFC	FFC	AISI H11 ou AISI H13
Cobre	FFC ligado	FFC ligado	FFC ligado

Na fundição de ligas de alumínio em moldações permanentes, em séries de peças elevadas ou muito elevadas, deverão ser utilizados aços de ferramenta para trabalho a quente, geralmente aços da família AISI H11 ou AISI H13, tal como é possível identificar na Tabela 3.

Serão em seguida apresentados dois exemplos de aços de ferramenta para trabalho a quente que poderão ser utilizados para o fabrico de coquilhas para o vazamento de ligas de alumínio por FCBP, ambos fornecidos pela empresa sueca, Uddeholm. As designações destes aços são:

- Uddeholm Vidar Superior (família AISI H11);
- Uddeholm Orvar Supreme (família AISI H13).

De acordo com (Uddeholm 2014a, 2014b), a terminologia “Supreme” e “Superior” é empregue para denotar a qualidade de excelência destes aços, ambos com estruturas bastante finas e de elevada pureza, com melhorias significativas relativamente aos aços AISI H11 e AISI H13, respetivamente. Ambos os aços são ligados ao Crómio, Molibdénio e Vanádio e são caracterizados pelas seguintes propriedades:

- Elevada resistência à fadiga térmica;
- Boa resistência mecânica a elevadas temperaturas;
- Elevada dureza e ductilidade;
- Boa maquinabilidade e fácil polimento;
- Facilidade de endurecimento;
- Elevada estabilidade dimensional durante o endurecimento;

Além de serem aplicados no fabrico de coquilhas para FCBP, estes aços poderão também ser utilizados para a produção de coquilhas para FI ou mesmo para moldes de injeção de plásticos. A sua aplicação em ferramentas para fundição não se restringe a coquilhas para o vazamento de ligas de alumínio, podendo também ser utilizados em coquilhas para o vazamento de ligas de estanho, chumbo, zinco e magnésio. Ambos possuem elevadas durezas, sendo que para a

produção de coquilhas para vazamento de ligas de alumínio por FCBP, a sua dureza deverá situar-se entre 410 HV e 480 HV (Uddeholm 2014a).

Na Tabela 4 e na Tabela 5, apresentam-se os elementos principais presentes na composição de cada um dos aços, assim como algumas propriedades físicas e mecânicas dos mesmos.

Tabela 4: Elementos principais presentes na composição dos aços de ferramenta para trabalho a quente: Vidar Superior e Orvar Supreme, da família dos aços AISI H11 Premium e AISI H13 Premium, respetivamente (Uddeholm 2014a, 2014b).

Designação	Família de aços	Elementos principais					
		C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)
Vidar Superior	AISI H11 Premium	0,36	0,30	0,30	5,00	1,30	0,50
Orvar Supreme	AISI H13 Premium	0,40	1,00	0,40	5,20	1,40	1,00

Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas dos aços Vidar Superior e Orvar Supreme, da família dos aços AISI H11 e AISI H13, respetivamente (Uddeholm 2014a, 2014b).

	Vidar Superior	Orvar Supreme
Propriedades físicas e a 400°C		
Densidade (kg/m ³)	7700	7700
Condutibilidade Térmica (W/m°C)	30	29
Propriedades mecânicas à temperatura ambiente		
Módulo de elasticidade (GPa)	180	180
Rm (MPa)	1450	1820
Rp0.2 (MPa)	1240	1520
Extensão após rotura (%)	13	(sem informação)

Em certos casos, nomeadamente quando as séries de produção são inferiores a 1000 unidades, as coquilhas poderão ser fabricados em ligas de alumínio (regra geral de alumínio-silício, por exemplo as ligas A-S4G (AlSi5Mg) e A-S13 (AlSi12)). A realização de um tratamento de anodização ou a utilização de revestimentos adequados permite aumentar a vida útil das mesmas (Mesquita 1971; Magalhães 1993).

2.3.3 Ligas vazadas em moldações metálicas

De acordo com (Magalhães 1993; Ferreira 1999), existe uma grande variedade de metais e suas ligas que poderão ser vazadas em coquilha. As mais utilizadas são as ligas de baixo/médio ponto de fusão (alumínio, magnésio, zinco) ou as de ponto de fusão moderadamente elevado (ligas de cobre). Relativamente à FCBP, as ligas de alumínio assumem uma utilização predominante. Idealmente, as ligas a serem vazadas deverão cumprir os seguintes requisitos:

- Baixo ponto de fusão;
- Boa fluidez;
- Não ataque das paredes da coquilha;
- Não dissolva gases, ou se os dissolver, não os liberte durante o arrefecimento;
- Não sejam frágeis, especialmente a altas temperaturas;
- Não tenham grande coeficiente de contração;
- Tendência baixa à fissuração a quente.

Obviamente, o que se passa na realidade é que nenhuma liga satisfaz simultaneamente todos os requisitos, havendo por isso que selecionar os mais importantes, que são: o baixo ponto de fusão, a boa fluidez e o não ataque da coquilha (Ferreira 1999).

A temperatura a que a liga é vazada tem uma grande influência na vida útil da ferramenta, sendo que esta tendencialmente diminuirá com o aumento da temperatura de vazamento (relacionada com a temperatura de fusão da liga em causa) (Ferreira 1999). A influência da temperatura de vazamento na vida útil da ferramenta encontra-se apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Temperatura de trabalho e vida aproximada das coquilhas, em função da liga vazada (Magalhães 1993).

Liga vazada	Temperatura de vazamento (°C)	Vida aproximada das coquilhas (nº de vazamentos)	Temperatura de trabalho das coquilhas (°C)
Ligas de Cobre	1040 – 1150	5000 – 20 000	120 – 260
Ligas de Alumínio	700 – 760	até 100 000	340 – 430
Ligas de Magnésio	650 – 710	20 000 – 100 000	150 – 320
Ligas de Zinco	390-430	100 000 ou mais	200 – 260

É possível verificar que existe a tendência para o encurtamento da vida útil da ferramenta quando as temperaturas de vazamento são relativamente elevadas. Obviamente que os valores da Tabela 6 são meramente exemplificativos, já que estes dependem da cadência de produção, das dimensões e da forma das peças, da composição da liga utilizada, dos revestimentos aplicados, entre outros fatores (Ferreira 1999).

2.3.4 Temperatura de vazamento

Segundo (Ferreira 1999), a temperatura de vazamento é um parâmetro de controlo bastante importante, não só para a minimização do número de defeitos como para o aumento da longevidade da coquilha. Por esse motivo, a temperatura de vazamento deverá estar contida dentro de certos limites de temperatura admissíveis. Estes limites são estabelecidos em função da composição da liga a ser vazada, da espessura das paredes da peça, do seu tamanho, do revestimento a ser usado, do sistema de gitagem, entre outros fatores.

No caso de serem utilizadas temperaturas abaixo da temperatura mínima admissível: a cavidade da coquilha poderá não ser preenchida na totalidade, os gitos ou alimentadores poderão solidificar antes da peça, e as secções finas da peça poderão solidificar muito rapidamente, levando à interrupção da solidificação direcional e respetivamente à produção de peças defeituosas (Ferreira 1999).

Por outro lado, as altas temperaturas de vazamento (superiores à temperatura máxima admissível) têm igualmente impactos severos tanto para as peças como para a ferramenta: podem provocar contrações excessivas nas peças, incitar à erosão excessiva e à possível distorção da coquilha, etc. Deste modo, a vida útil da ferramenta poderá diminuir drasticamente (Ferreira 1999).

Para o caso das ligas de alumínio, as temperaturas de vazamento variam entre os 700 °C e os 760 °C (Mesquita 1971), sendo que em casos específicos poderão situar-se entre os 650 °C e os 790 °C (Ferreira 1999). Uma vez estabelecida a temperatura de vazamento para uma dada peça, esta poderá admitir variações de apenas mais ou menos 10 °C (Ferreira 1999).

2.3.5 Temperatura da moldação metálica

De acordo com (Torre 2004; Mesquita 1971; Magalhães 1993), o controlo preciso da temperatura de trabalho das coquilhas é fundamental para a obtenção de fundidos com elevada qualidade. No caso do vazamento de ligas de alumínio e previamente à fundição de qualquer tipo de peça, a coquilha deverá ser aquecida a cerca de 110 °C e as suas superfícies moldantes revestidas por uma tinta refratária, que evita o ataque da coquilha pelo alumínio líquido. Estes revestimentos são geralmente aplicados sob a forma de *spray* e permitem: minimizar o desgaste da coquilha, controlar a velocidade de solidificação, promover um melhor acabamento das peças e facilitar a remoção dos fundidos, entre outras funções. A temática dos revestimentos será abordada na secção 2.3.6 desta dissertação.

Depois de revestida a coquilha, e através da utilização de maçaricos, reaquece-se a ferramenta até cerca de 350 °C, ficando a ferramenta preparada para receber o alumínio, que é vazado a uma temperatura entre 700 °C e 760 °C. Tendo a coquilha entrado em serviço, o calor que lhe é transmitido no decorrer do vazamento e da solidificação promoverá o aumento ou a diminuição da sua temperatura, dependendo se a cadência de produção é elevada ou baixa, respetivamente. O ideal seria que a cadência utilizada mantivesse a temperatura da coquilha

constante de ciclo para ciclo. Regra geral, verifica-se que as cadências utilizadas implicam que a coquilha aqueça, devido a uma menor dissipação de calor comparativamente com o calor que esta recebe. Por esse motivo, utilizam-se sistemas de refrigeração que permitem diminuir a temperatura da coquilha, de modo a não serem produzidas peças defeituosas por um aquecimento excessivo da ferramenta.

Evitando o sobreaquecimento da coquilha e minimizando as suas flutuações térmicas é possível maximizar a vida útil da ferramenta, podendo esta atingir valores entre os 100 000 e os 250 000 ciclos. Obviamente, a longevidade da coquilha dependerá de outros fatores, nomeadamente a utilização de revestimentos adequados, assim como a sua correta aplicação, realização de manutenção periódica da ferramenta, entre outros fatores (Magalhães 1993; Mesquita 1971; Torre 2004).

As coquilhas deverão permitir um arrefecimento rápido para que os ciclos de vazamento não sejam muito longos. De qualquer modo, muitas vezes não poderá ser demasiado rápido porque poderá promover a solidificação prematura do metal, antes da cavidade da ferramenta estar completamente preenchida. Tendo em conta que no processo de solidificação da liga ocorre a transferência de calor para a coquilha, a sua espessura deverá então ser projetada de modo a que a solidificação se dê de acordo com o pretendido. No controlo da velocidade de arrefecimento, os revestimentos das coquilhas desempenham um importante papel, a analisar na secção 2.3.6 (Marques 2010).

2.3.6 Revestimentos

De acordo com (Ferreira 1999), os revestimentos são aplicados nas coquilhas e nos machos para aumentar a sua vida útil, pois servem como barreira entre o metal fundido e as superfícies do molde, enquanto se forma a primeira película de metal solidificado. As vantagens da utilização dos revestimentos são múltiplas, sendo que é possível destacar as mais importantes:

- Prevenir o arrefecimento prematuro do metal fundido;
- Controlar a direção e velocidade de solidificação da peça, e por conseguinte, a sua estrutura e sanidade;
- Minimizar os choques térmicos na coquilha;
- Evitar a soldadura do metal fundido à coquilha;
- Escoar o ar aprisionado na cavidade moldante.

Segundo (Ferreira 1999; Torre 2004), os revestimentos dividem-se geralmente em dois grandes grupos: os isolantes e os condutores, desempenhando alguns as duas funções. Os revestimentos isolantes têm a função de prevenir o arrefecimento rápido da coquilha, conseguindo-se com isto fundir peças de paredes mais finas. Um bom revestimento isolante pode ser feito de uma parte de Silicato de Sódio e duas partes de Caulino coloidal, em água suficiente para permitir a pulverização. Este tipo de revestimentos facilitam a desmoldagem e melhoram o acabamento superficial das peças.

Os revestimentos condutores, normalmente à base de grafite, são utilizados em zonas da coquilha a que correspondem normalmente as regiões com uma maior espessura, que convém arrefecerem mais rapidamente. Este tipo de revestimento é normalmente utilizado na fundição de ligas de alumínio e de magnésio (Ferreira 1999; Torre 2004).

Embora possam ser utilizados variadíssimos revestimentos, cada um eventualmente com propriedades distintas dos demais, todos eles deverão cumprir os seguintes requisitos (Ferreira 1999):

- Não serem corrosivos;
- Aderir com facilidade ao molde e ser de fácil remoção;
- Serem inertes relativamente ao metal fundido (não reativos) e não produzir gases.

Relativamente à vida útil do revestimento, esta varia consideravelmente com a temperatura do metal a ser vazado, com o tamanho e a complexidade da cavidade da coquilha e com cadência de produção. Alguns revestimentos são aplicados a cada vazamento, outros funcionam ao longo de vários turnos antes que um novo revestimento seja necessário (podendo necessitar de ligeiras reparações pontuais) (Ferreira 1999).

As propriedades requeridas para um revestimento nem sempre são obtidas com uma formulação, sendo muitas vezes obtidas aplicando diferentes revestimentos em diferentes locais da coquilha. Do mesmo modo, poder-se-ão aplicar camadas de revestimento de diferentes espessuras, de modo a intensificar as suas propriedades isolantes/condutoras, promovendo a solidificação direcional do metal. Através da análise de diversos fabricantes de revestimentos, é possível identificar uma enorme quantidade de revestimentos, que poderão satisfazer praticamente qualquer necessidade. Existem revestimentos para aplicação genérica, outros para aplicações muito específicas: para o vazamento em moldações permanentes, a Foseco comercializa mais de 50 tipos de revestimentos, onde o "DYCOTE 6" é indicado como o revestimento de aplicação mais genérica (de isolamento). Na aplicação do revestimento, a temperatura da coquilha e o modo de aplicação deverão cumprir as indicações especificadas pelo fabricante, de modo a promover uma correta aderência e funcionalidade do revestimento, minimizando eventuais impactos prejudiciais para a coquilha e para as peças (Torre 2004; Ferreira 1999; Foseco 2007).

Os revestimentos utilizados nas coquilhas para FCBP são, regra geral, idênticos aos aplicados nas coquilhas para fundição por gravidade. Na FCBP, no caso de serem utilizados tubos de enchimento em ferro fundido, é prática comum protegê-los com uma camada de revestimento isolante. Este revestimento não só minimiza a queda de temperatura da liga ao longo da subida no tubo, através do aumento do isolamento do tubo, como minimiza a aderência da liga às suas paredes. A aplicação do revestimento é geralmente realizada através da imersão do tubo quente numa mistura espessa de revestimento. Após a remoção do tubo, dever-se-á proceder a uma secagem cuidadosa de modo a prevenir que o revestimento perca a sua adesão. Um revestimento apropriado para esta aplicação, tal como no revestimento de gitos e alimentadores, é o "DYCOTE 7029" da Foseco, utilizado atualmente na STA. Tal como referido anteriormente, cada vez mais são utilizados tubos de enchimento cerâmicos, em sialon ou titanato de alumínio, que dispensam o uso destes revestimentos (Foseco 2007).

2.3.7 Tensões de origem térmica em moldações metálicas

Segundo (Magalhães 1993), o desenvolvimento das tecnologias de vazamento em coquilha, cujas vantagens já foram descritas anteriormente, está condicionado a se obterem coquilhas mais baratas e com uma maior durabilidade. Estes dois fatores dependem fundamentalmente da simplicidade e baixo custo do seu fabrico, assim como do seu comportamento em serviço. É necessária uma especial atenção à fadiga térmica, provocada pelas tensões de origem térmica que se geram. As tensões geradas têm uma forte relação com as diferenças de temperatura entre a coquilha e o metal, assim como com os coeficientes de dilatação lineares dos materiais da estrutura, e eventuais constrições exteriores.

As Figuras 11, 12 e 13 mostram a influência das constrições exteriores, em uma, duas e três direções, no valor da tensão máxima de origem térmica (σ_{max}), correspondente a um incremento ΔT de temperatura em relação a uma temperatura de equilíbrio. Para a temperatura de equilíbrio, é considerado que as tensões de origem térmica são iguais a zero. Os parâmetros E e ν , representam o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, respetivamente, do material de fabrico da coquilha (Magalhães 1993).

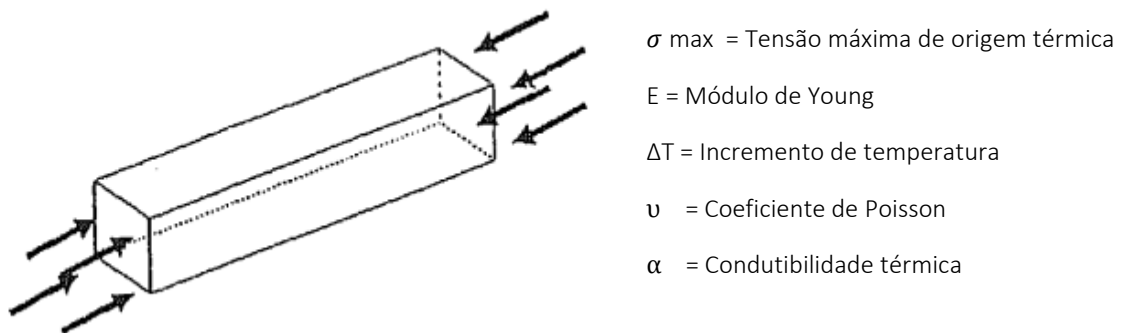


Figura 11: Deslocamento restrito a zero numa direção (Magalhães 1993)

$$\sigma_{max, 2d} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

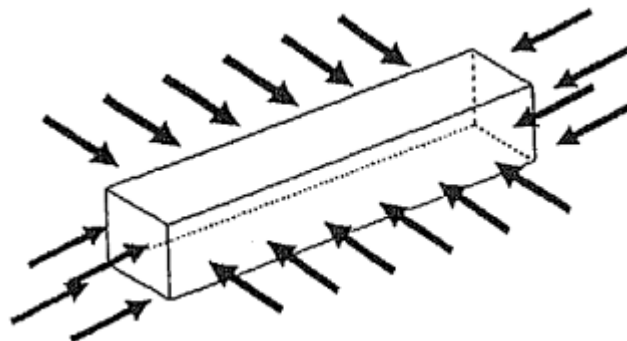


Figura 12: Deslocamento restringido a zero em duas direções (Magalhães 1993)

$$\sigma_{máx, 2d} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T / (1 - \nu) \quad (2)$$

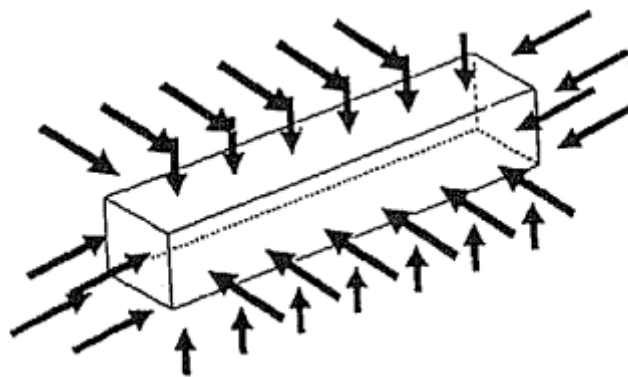


Figura 13: Deslocamento restrito a zero em três direções (Magalhães 1993).

$$\sigma_{\text{máx}, 3d} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T / (1 - 2\nu) \quad (3)$$

Admitindo que o coeficiente de Poisson tem o valor de $\nu = 0,33$ (para o aço), resulta:

$$\sigma_{\text{máx}, 3d} = \sigma_{\text{máx}, 1d}$$

É possível deste modo perceber que as próprias condições de fixação de uma peça numa estrutura rígida, influenciam o valor das tensões térmicas correspondentes a uma determinada diferença de temperatura ΔT . O próprio valor de ΔT , ao qual é proporcional a tensão máxima, deve ser considerado com cautela. Considerando que a coquilha se encontra rigidamente presa à coquilhadora, o ΔT anteriormente apresentado corresponde à diferença de temperaturas entre o ponto mais quente da coquilha e a temperatura da estrutura de suporte e amarração desta (coquilhadora). Assim sendo, consoante a ligação seja feita através de uma, duas ou três direções independentes, terá de ser considerada a expressão (1), (2) ou (3), respetivamente.

Nestas circunstâncias, urge a necessidade de saber se existe algum processo de reduzir a tensão máxima que não seja diminuindo a diferença de temperaturas entre o ponto mais quente da coquilha e a estrutura de suporte e amarração desta. Na ausência de qualquer constrição exterior, uma coquilha cuja face de trabalho esteja mais quente do que a face oposta, teria tendência a encurvar. É notório que esta situação é inaceitável, visto que uma coquilha empenada torna-se impossível de encher com metal líquido, uma vez que as duas partes que compõem a coquilha não encostariam completamente uma na outra, a não ser num ponto central. O efeito da encurvadura gerada pode ser observado na Figura 14. Caso a distribuição de temperatura ao longo da espessura seja linear, não surgirão tensões de origem térmica.

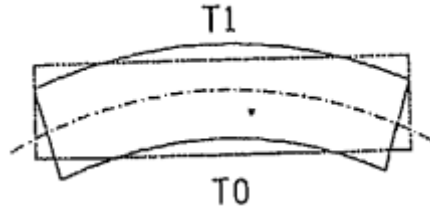


Figura 14: Encurvadura de uma barra sujeita a um gradiente térmico (Magalhães 1993).

A manutenção da geometria (normalmente plana) da superfície de apartação é imprescindível, sendo normalmente conseguida através da aplicação de tensões de compressão numa das faces e de tração na outra, com um momento fletor que contraria a encurvadura de origem térmica que tende a gerar-se.

Se a coquilha for fixada na coquilhadora por forma a impedir apenas a sua encurvadura (com um único ponto de fixação), e se a distribuição de temperaturas for linear (dT) nesta, a tensão máxima será:

$$\sigma_{m\acute{a}x, \text{ não encurv, } dT, 1d} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T / 2 \quad (4)$$

Tratando-se de uma coquilha de geometria próxima da de uma placa (como é normal), resulta:

$$\sigma_{m\acute{a}x, \text{ não encurv, } dT, 2d} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot (1 - \nu) / 2 \quad (4^*)$$

Caso seja feita uma comparação da expressão (2) com a expressão (4*), é possível concluir que a modificação da estrutura de fixação da coquilha (alterada para uma única amarração central que a impede de empenar), provoca uma diminuição da tensão máxima para metade do que era numa fixação rígida bidimensional.

Considerando agora que a distribuição de temperaturas ao longo da espessura não é linear (ndLT), a tensão máxima passa, deste modo, a ser dada pelas expressões (5) e (5*):

$$\sigma_{m\acute{a}x, \text{ não encurv, ndLT, } 1d} = E \cdot \alpha \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{fibr. \text{ neutra}}) \quad (5)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x, \text{ não encurv, ndLT, } 2d} = E \cdot \alpha \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{fibr. \text{ neutra}}) / (1 - \nu) \quad (5^*)$$

Na Figura 15 são apresentadas as duas situações (distribuição linear e não linear de temperaturas):

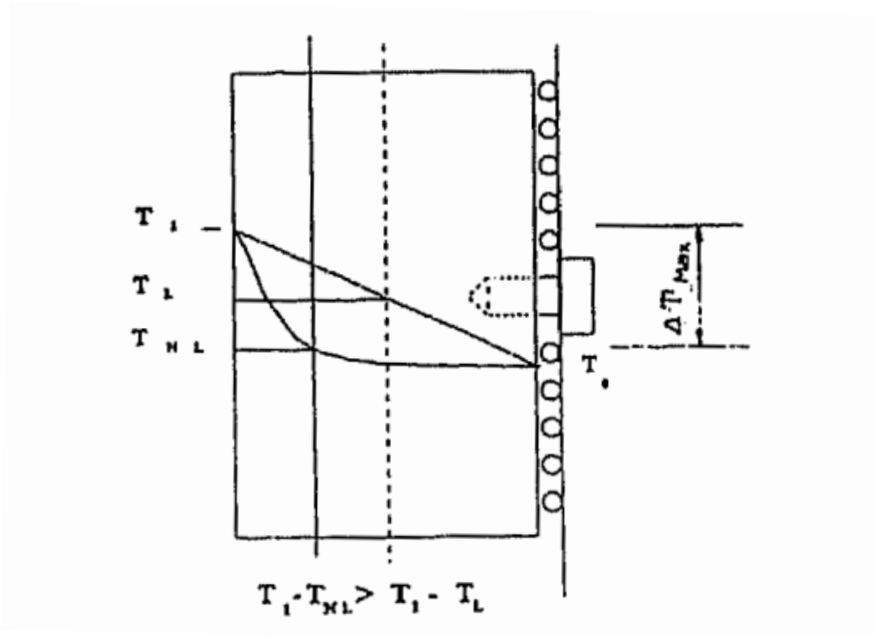


Figura 15: Máxima tensão de origem térmica, devida a uma distribuição linear e não linear de temperaturas ao longo da espessura (Magalhães 1993).

A máxima tensão térmica devida a uma distribuição não linear das temperaturas numa coquilha livre de escorregar no prato de uma coquilhadora, é proporcional a $\Delta T_{máx}$, onde $\Delta T_{máx}$ é a diferença entre a temperatura da face quente e a temperatura da fibra neutra (isenta de tensões térmicas), ou seja:

$$\Delta T_{máx} = T_{máx} - T_{Fn} \quad (6)$$

Caso sejam comparados os valores das tensões em duas coquilhas fixadas de formas diferentes, e supondo que a temperatura máxima atingida na coquilha é $T_{máx} = 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, que a temperatura da sua fibra neutra é $T_{fn} = 320 \text{ }^{\circ}\text{C}$, e que a temperatura da estrutura à qual a coquilha está fixada é $T_{estr} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, teremos:

Coquilha rigidamente fixada em duas direções:

$$\sigma_{máx, 2d} = E \cdot \alpha \cdot \frac{600-40}{0.67} \quad (7)$$

Coquilha livre de escorregar, apenas impedida de empenar:

$$\sigma_{máx, não\ encurv} = E \cdot \alpha \cdot \frac{600-320}{0.67} = \sigma_{máx, 2d}/2 \quad (8)$$

Existem dois processos distintos que permitem diminuir a máxima tensão de origem térmica que é gerada numa coquilha. O primeiro consiste em diminuir o valor do produto $E.\alpha$, optando por materiais com um baixo módulo de Young ou baixo coeficiente de dilatação linear, ou eventualmente ambos. A segunda solução consiste em diminuir $\Delta T_{\text{máx}}$, recorrendo à utilização de materiais para a coquilha que permitam uma maior dissipação de calor, não promovendo um aquecimento excessivo da mesma.

A máxima tensão de origem térmica pode também ser diminuída através da utilização de revestimentos. Caso o revestimento seja bem aderente ao substrato mas sem resistência mecânica intrínseca, o gradiente térmico que efetivamente conta para efeitos de tensões criadas, é apenas o que se verifica no substrato. Caso a barreira existente seja eficiente, a tensão gerada poderá ser significativamente inferior do que seria sem a barreira térmica (Magalhães 1993).

2.3.8 Defeitos típicos do vazamento em moldações permanentes

De acordo com (Zhang et al. 2005; Ferreira 1999), existe uma grande diversidade de defeitos *standard* que poderão originar a inviabilização da comercialização de uma determinada peça, dos quais é possível destacar os mais comuns: rechupes, porosidades e inclusões. É importante perceber o motivo ou os motivos pelos quais estes defeitos se formam, como eles afetam a qualidade das peças fundidas e como será possível minimizar a sua ocorrência.

A aparência estética, as propriedades mecânicas, a estanqueidade ou as propriedades acústicas, constituem alguns dos parâmetros de análise de qualidade dos produtos de fundição, sendo que existe naturalmente um conjunto mais alargado de parâmetros que poderão e deverão ser analisados, dependendo da peça e da sua função. O cumprimento das especificações anteriormente referidas é função do tipo e da dimensão dos defeitos presentes nas peças.

Embora exista uma grande diversidade de defeitos no seio das peças fundidas, apenas serão analisados aqueles que estão tipicamente presentes em produtos obtidos por processos de fundição em moldações permanentes, nomeadamente os mais comuns em peças em ligas alumínio, ou seja:

- Falta de enchimento;
- Rechupes;
- Porosidades;
- Inclusões endógenas e exógenas.

Inclusões

Segundo (Marques 2010), as inclusões podem subdividir-se em dois grandes grupos: as endógenas e exógenas.

1. Inclusões endógenas

São partículas pequenas que permanecem em suspensão no metal líquido durante a fase de vazamento, ou que podem precipitar-se devido a alterações de solubilidade durante o arrefecimento. As inclusões endógenas encontram-se normalmente dispersas por toda a peça, e são inerentes à liga e ao processo de fusão.

As reações responsáveis pela formação de inclusões endógenas envolvem impurezas comuns, tais como oxigénio, azoto e enxofre, que interagem com os constituintes mais reativos da liga a vazar. A reação mais comum é a oxidação, especialmente para ligas de alumínio.

À medida que estas inclusões se formam, a separação gravítica inicia-se. Esta tendência é expressa na *Lei de Stoke*, para pequenas partículas esféricas suspensas no metal líquido:

$$V = \frac{2}{9} \times \frac{r^2 g (\rho_1 - \rho_2)}{\mu} \quad (9)$$

Onde,

V = Velocidade de separação [m/s]

r = Raio da partícula [m]

ρ_1 = Densidade do líquido [kg/m³]

ρ_2 = Densidade da partícula [kg/m³]

μ = Viscosidade do líquido [Ns/m²]

g = Aceleração da gravidade [m/s²]

Uma vez que as partículas de maiores dimensões se separam rapidamente, é necessário que o metal líquido possa permanecer no forno ou no cadinho durante um intervalo de tempo antes de se proceder ao vazamento, fazendo com que seja um método viável, apesar da continuidade de partículas de menor dimensão, visto que o tempo necessário para a total eliminação das mesmas é incomportável. Para o caso das ligas leves, a separação por ação gravítica não é eficaz, devido à pequena diferença entre a densidade do metal e a densidade das partículas. Deste modo, é fundamental que a superfície não seja perturbada durante o processo de fusão (Marques 2010).

A minimização das inclusões endógenas reside em grande parte no domínio da técnica de fusão, nomeadamente a utilização de critérios de seleção de cargas mais apertados e técnicas de fusão e refinação apropriadas. O recurso à fusão em vácuo e/ou atmosferas inertes é uma forma de minimizar o aparecimento deste tipo de inclusões (Marques 2010).

2) Inclusões exógenas

São constituídas por materiais não originários no próprio metal vazado, nomeadamente na desagregação das moldações, cadinhos ou quaisquer outras ferramentas em contacto com o metal líquido, podendo contribuir para o aparecimento de escórias. As escórias podem ser evitadas através da decantação do metal aquando do seu vazamento, para o que se recorre grande parte das vezes à utilização de filtros cerâmicos, temática a explorar na secção 2.5.2 desta dissertação. A utilização de filtros permite diminuir a turbulência causada pela entrada do metal líquido na cavidade da moldação. A turbulência contribui para o aparecimento de inclusões, não só devido ao aumento da erosão das moldações mas também devido ao aprisionamento de ar dentro da cavidade (Marques 2010).

O ar aprisionado pelo metal na cavidade da moldação poderá ter origem em diversos fatores, isolados ou em combinação, dos quais é possível destacar (Marques 2010):

- Turbulência excessiva no vazamento;
- Insuficiente sobreaquecimento da liga fundida;
- Sistema de ventilação inadequado.

O enchimento lento e controlado da moldação facilita a libertação do ar, minimizando o aparecimento de inclusões, motivo pelo qual a FCBP poderá ser uma grande mais-valia.

Analogamente, o enchimento lento, direcional e sem confluências minimiza o aparecimento de outro grupo de inclusões: os filmes de óxidos. Estas películas, quando existentes, são transportadas na superfície frontal do fluxo de metal, podendo estar na origem de alguns defeitos de fundição. Em casos mais severos, os filmes de óxidos poderão gerar uma elevada concentração de tensões, promovendo a iniciação de fendas por fadiga. Em adição, as fendas provocadas pelos referidos filmes de óxidos podem atuar como locais de nucleação de porosidades, podendo levar à fissuração a quente ou à não estanqueidade dos produtos de fundição (Marques 2010; Zhang et al. 2005).

A Figura 16 mostra um filme de óxido na origem de um defeito de estanqueidade de uma jante automóvel.

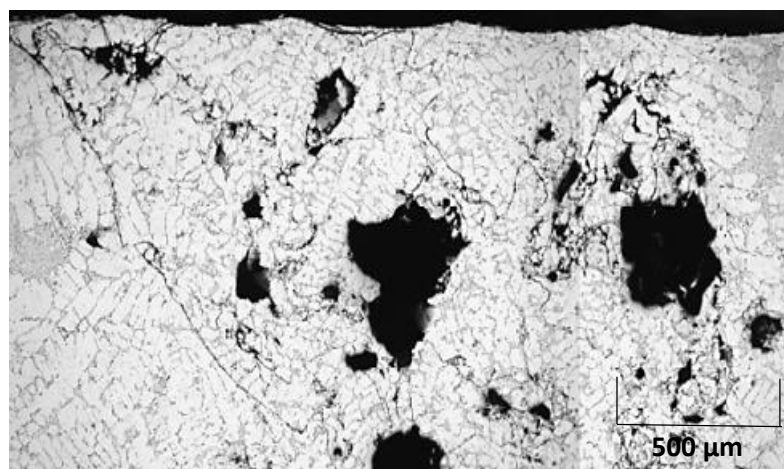


Figura 16: Defeito de estanqueidade numa jante automóvel: rede de filme de óxidos e porosidades (Zhang et al. 2005).

Contração na mudança de estado - rechupes

Os rechupes, também denominados incorretamente na gíria corrente como “porosidades de contração”, surgem quando não se compensa devidamente a falta de metal líquido aquando da solidificação, sendo que a sua ocorrência se deve a um incorreto dimensionamento dos sistemas de gitagem e alimentação (Marques 2010).

No processo de solidificação da liga, ocorre uma contração volumétrica associada à transformação entre os estados líquido e sólido. Deste modo, caso a referida contração não seja compensada com metal líquido, haverá a formação de um vazio (rechupe). Quanto maior a contração volumétrica da liga, maior a tendência para a formação deste tipo de defeitos. Para evitar a formação de rechupes, não só deverão ser colocados alimentadores próximos das últimas zonas da peça a solidificar, como deverá ser garantida uma solidificação direcional das peças, permitindo anular o perigo potencial dos macrorechupes, “transportando-os para fora das peças”. No caso do aparecimento de rechupes, pode haver necessidade de redesenhar completamente os sistemas de gitagem e alimentação, ou mesmo realizar alterações na geometria das peças, isto porque, a sua geometria poderá impedir uma alimentação eficaz (Ferreira 1999; Marques 2010; Neto 1985).

A crescente utilização de *softwares* de simulação numérica para a simulação do processo de solidificação tem desempenhado um importante papel na previsão deste tipo de defeitos.

A Figura 17 apresenta o seccionamento de uma jante automóvel, obtida por FCBP, onde é possível observar a formação de rechupes de dimensão considerável.

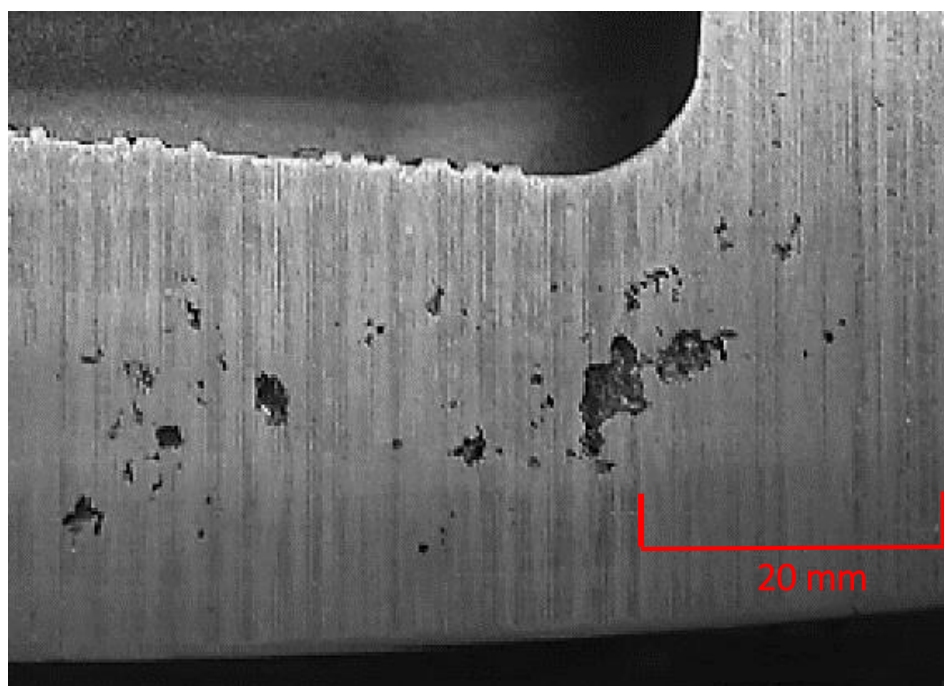


Figura 17: Macrorechupes visíveis através do seccionamento de uma jante automóvel (Zhang et al. 2005).

Enquanto que as ligas que solidificam rapidamente produzem cavidades bem definidas, as ligas que solidificam mais lentamente tendem a produzir vazios dispersos na microestrutura da peça. Este tipo de defeitos inter cristalinos, de menor dimensão comparativamente com os rechupes, tem a corrente designação de micro-rechupe. A formação de micro-rechupes é agravada pela libertação de gás durante a solidificação (Marques 2010; Melo 2014).

Na Figura 18 representa-se a micrografia de um puxador de uma porta, produzido na STA através de FCR, que revela a presença de microrechupes.

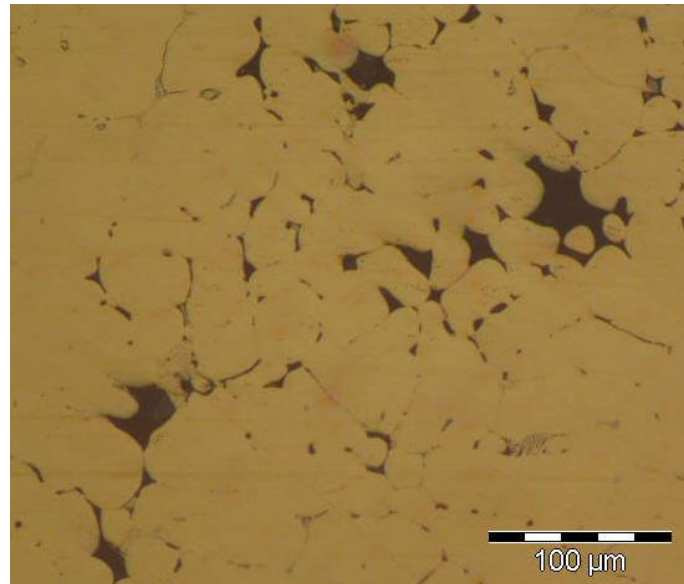


Figura 18: Micrografia que indica a formação de microrechupes num puxador obtido por FCR, na STA.

A sensibilidade à formação de microrechupes é muitas vezes diminuída pela tendência ao rechupe superficial, o que acarreta necessidade de maquinagem extra no sentido de restabelecer a forma geométrica das peças (utilização de sobre espessuras extra em zonas pré-determinadas), mas compromete menos a sanidade metalúrgica das peças fundidas (Neto 1985).

Contração no estado sólido

Segundo (Marques 2010; Melo 2014), além da contração na passagem do estado líquido para o estado sólido, existe também a contração devido ao arrefecimento da liga desde a temperatura de *solidus* até à temperatura ambiente (contração no estado sólido). Ao invés da contração na mudança de estado, que poderá ser compensada através de um fluxo de metal, a contração no estado sólido afeta todas as dimensões lineares da peça. Por este motivo, estas contrações são contabilizadas no desenho e projeto das peças.

Apresentam-se na Tabela 7 algumas propriedades relevantes para a fundição de alumínio e de outros metais, nomeadamente a contração linear aproximada até 20 °C.

Tabela 7: Propriedades relevantes para a fundição de alumínio e de outros metais (Marques 2010).

Metal	Coefficiente de expansão linear ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^6$)	Ponto de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	Contração linear aproximada até 20 $^{\circ}\text{C}$ (%)
Alumínio	29,2	660	1,9
Cobre	20,6	1083	2,2
Magnésio	31,4	649	2,0
Zinco	35,9	420	1,4

A contração no estado sólido inicia-se imediatamente após a formação de uma massa significativa de metal solidificado. Na prática, como o metal nunca contrai livremente, geram-se tensões internas que poderão ser a origem de defeitos nas peças. Caso a resistência à contração se torne crítica a temperaturas elevadas, quando a liga se encontra num estado ainda relativamente frágil, a probabilidade de ocorrer fissuração a quente é elevada (Marques 2010).

A fissuração a quente é caracterizada por apresentar uma forma irregular, exibindo uma fratura parcial ou completa segundo um caminho intergranular. Este tipo de fissuração poderá ocorrer em zonas onde existe uma diferença abrupta na secção da peça (maior concentração de tensões), tal como pode ser observado na Figura 19 (Melo 2014).

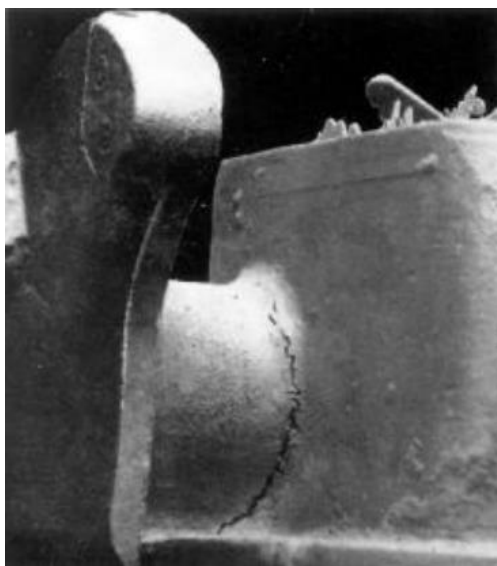


Figura 19: Exemplo da fissuração a quente (Marques 2010).

A fissuração a frio, contrariamente à fissuração a quente, caracteriza-se por grandes extensões nas fissuras, lineares e direitas (em oposição à irregularidade da fissuração a quente). Ocorre no período em que a peça já arrefeceu abaixo das temperatura de fissuração a quente, mas ainda se encontra a cima da temperatura correspondente ao domínio elástico (nesta fase a peça apenas tem uma resistência mecânica limitada) (Melo 2014).

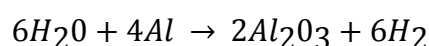
Falta de enchimento

A falta de enchimento pode ter várias causas possíveis, incluindo o ar aprisionado, a libertação de vapores, a baixa temperatura da moldação ou a baixa temperatura de vazamento. Estes defeitos são geralmente causados pela combinação de dois ou mais fatores. Uma ventilação adequada é o modo mais simples de eliminar o ar aprisionado. Ao aumentar a temperatura de vazamento, assim como a temperatura da moldação metálica ou ambas, pode-se eliminar a falta de enchimento, mas é suscetível de se causarem outros defeitos, tais como porosidades. Uma aproximação comum é aumentar a temperatura da moldação em locais críticos, aplicando calor através de fontes exteriores ou aplicando um isolamento em locais específicos da ferramenta de modo a prevenir que o metal arrefeça rapidamente. Este facto é especialmente importante em zonas das peças que possuam espessuras finas (Ferreira 1999).

Porosidades

Segundo (Marques 2010), as porosidades podem resultar do aprisionamento de ar durante o vazamento, a partir da evolução do contacto entre o metal líquido e material da moldação (por exemplo entre o metal e o revestimento), ou podem resultar da formação de precipitados durante a solidificação, associado a uma mudança na solubilidade com a temperatura.

O último ponto referido constitui um potencial problema para o caso da fundição de ligas de alumínio, devido à grande tendência que estas ligas apresentam para a captação de hidrogénio através da decomposição do vapor de água, de acordo com a equação (Zhang et al. 2005):



Como existe uma queda abrupta na solubilidade do hidrogénio entre as fases líquida e sólida, haverá tendência à precipitação de hidrogénio no líquido, originando porosidades gasosas (Zhang et al. 2005).

As porosidades devidas ao hidrogénio apresentam geralmente formas arredondadas, com um fator de forma entre 0,6 e 1 (sendo o fator de forma de uma esfera igual à unidade). Em certos casos poderão apresentar outras configurações, nomeadamente no caso da porosidade intergranular, onde existe a tendência à formação de geometrias côncavas devido à precipitação na interface sólido-líquido (Marques 2010).

Relativamente à dimensão dos poros, esta não é apenas influenciada pelo teor de determinado gás na liga, mas depende em grande escala das condições de solidificação. Grande parte das vezes estes defeitos localizam-se logo abaixo da superfície da peça, sendo apenas revelados após maquinagem. Este facto pode ser observado na Figura 20, onde é possível identificar um poro revelado após maquinagem (Zhang et al. 2005).

A Figura 21 apresenta duas micrografias de uma jante automóvel em liga de alumínio, que revelam a presença de porosidades gasosas devido ao alto teor em hidrogénio.

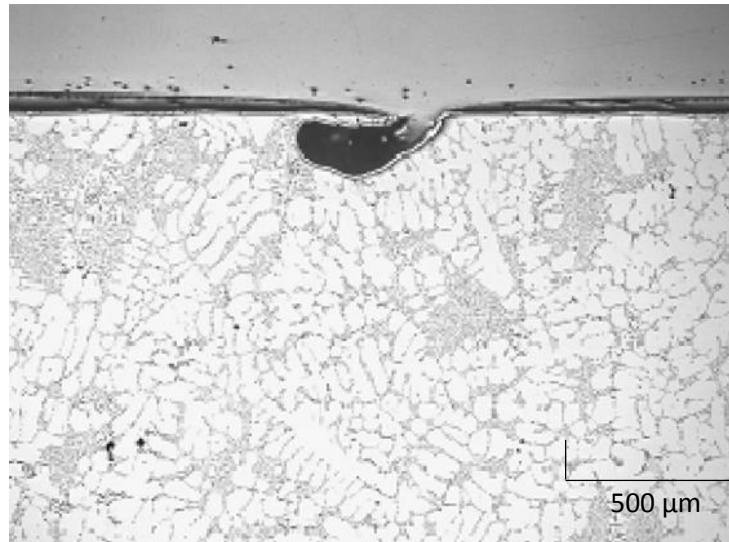


Figura 20: Poro revelado após maquinagem da face de uma junta automotiva em liga de alumínio (Zhang et al. 2005).

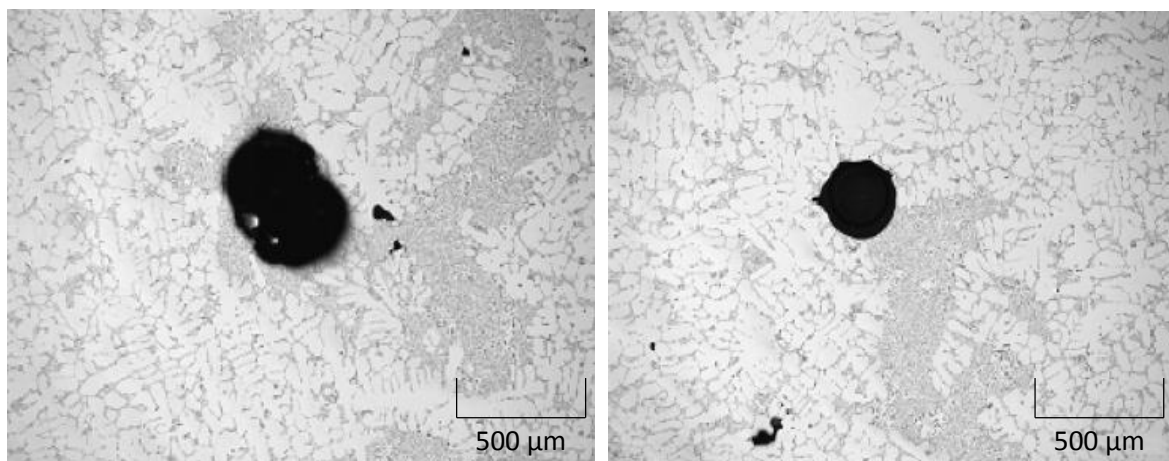


Figura 21: Micrografias que revelam a presença de porosidades (com origem no elevado teor em hidrogénio) numa junta automotiva em liga de alumínio (Zhang et al. 2005).

Devido ao grande impacto que as porosidades têm nas peças, tanto a nível resistência mecânica como de carácter estético, deverão ser adotadas técnicas de fusão e vazamento apropriadas, de modo a minimizar o conteúdo de gases presentes na liga. A absorção de gases, o seu efeito e o seu controlo será explorada mais em pormenor na secção 2.4.6 desta dissertação.

2.4 Alumínio e suas ligas

2.4.1 Introdução histórica

Segundo (Novais 2000), o alumínio, como metal, foi descoberto pelo cientista Humphrey Davy em 1808, que o designou por “Aluminium” sem, contudo, conseguir isolá-lo dos seus compostos. Ocorreram diversos progressos durante o século XIX, em que os principais impulsionadores foram Oersted, Woehler e Sainte-Claire Deville. O primeiro processo viável de produção foi descoberto em 1886, quase simultaneamente pelo francês Pault Heroult e pelo americano Charles Martin Hall, através de um processo eletrolítico, principal método de produção de alumínio utilizado até à data.

O alumínio não ocorre na natureza como um metal, surgindo na forma de alumina (óxido de alumínio). A alumina é um dos recursos naturais mais abundantes na crosta terrestre, constituindo 8% da mesma. O minério da qual provém é a bauxite, e contém em média entre 45% a 60% de alumina. Existem diversos processos de extração deste minério, sendo que é apenas considerada rentável a sua extração para casos em que o conteúdo em alumina se situa entre 50% a 60%.

A composição da bauxite pode ser na maior parte dos casos representada por $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, contendo percentagens variáveis de impurezas como o óxido de ferro, titânio e outros minérios característicos da sua proveniência (Novais 2000).

Inicialmente, a utilização do alumínio em fundição não apresentava grande interesse prático, muito devido às pobres características mecânicas assim como à grande dificuldade na sua maquinagem nessa época. A utilização do alumínio puro era essencialmente em peças que exigiam uma boa resistência à corrosão, assim como elevada condutibilidade térmica. Posteriormente, ao serem adicionados elementos de liga ditos endurecedores, surgiu uma vasta gama de ligas de alumínio para as mais diversas aplicações, mesmo para aquelas onde as elevadas exigências mecânicas e metalúrgicas constituíam um requisito (Mesquita 1971).

Só a partir do final do século XIX é que o alumínio foi passível de ser produzido em escala industrial. O alumínio é, deste modo, um metal de utilização relativamente recente em comparação com outros metais como o cobre e o ferro (Novais 2000).

As peças fundidas em alumínio desempenharam um papel fundamental no crescimento da indústria desde a sua aplicação no final do século 19. Os primeiros produtos comercializados em alumínio foram provenientes de fundição, em aplicações como utensílios de cozinha e peças de decoração, que exploraram a novidade e utilidade deste metal. Rapidamente foi possível uma expansão das suas aplicações de modo a corresponder aos requisitos de diversos ramos da engenharia. Na atualidade, os fundidos em alumínio são produzidos em centenas de composições de liga e através de diversos processos dos quais se destacam a FI, FCBP, FCG, fundição em areia e o *investment casting* (ASM International 1998).

2.4.2 Produção de alumínio primário

Após a extração da bauxite, procede-se à refinação dos minérios através do processo Bayer, obtendo-se desta forma alumina pura. O alumínio é produzido numa célula eletrolítica que contém alumina dissolvida num eletrólito fundido, denominado de creolite (Na_3AlF_6). A função da creolite consiste em permitir que a eletrólise ocorra a uma temperatura bastante inferior relativamente à temperatura a que ocorreria caso esta não fosse utilizada. Desta forma, a temperatura à qual ocorre a eletrólise é cerca de 1000 °C, bastante inferior à alta temperatura de fusão da alumina (2072 °C). A corrente elétrica que é produzida na célula eletrolítica é transferida por meio de um ânodo em carbono e promove a redução do óxido de alumínio. O oxigénio combina-se então com o carbono do eletrodo, formando-se dióxido de carbono e monóxido de carbono, enquanto que o alumínio fundido se deposita no fundo catódico, sendo removido (Novais 2000; "Alumínio" 2014; Marques 2010).

Segundo (Novais 2000; "European Aluminium Association " 2014), a produção do alumínio consome grandes quantidades de energia, embora esse valor tenha decrescido de cerca de 26,5 kW/h para 15,4 kW/h nos últimos 50 anos. Devido aos elevados gastos energéticos associados a todo o processo de produção do alumínio, é importante que sejam adotadas estratégias de reciclagem dos diversos produtos em que a sua vida útil atingiu o término. É importante destacar que comparativamente com o processo de produção através da bauxite, a reciclagem do alumínio consome cerca de 5% da energia total que seria despendida, valor bastante baixo e pelo qual é realmente importante promover a reciclagem deste metal. A reciclagem não danifica a estrutura do metal, podendo este ser reciclado inúmeras vezes sem que as suas propriedades mecânicas e metalúrgicas sejam alteradas.

Em geral, antes do alumínio ser conformado em lingotes, faz-se a adição de pequenas quantidades de elementos de liga, permitindo a obtenção de ligas com propriedades específicas para as mais diversas aplicações. A adição de elementos de liga e a sua importância será abordada na secção 2.4.5 deste relatório.

2.4.3 Propriedades do alumínio puro

De acordo com (Marques 2010; Kalpakjian e Schmid 2009), o alumínio apresenta-se como um metal branco, brilhante, muito leve, não magnético, densidade aproximada 2,7 e funde por volta dos 660 °C. Tem uma elevada condutividade térmica e elétrica e é considerado como sendo não tóxico. Uma das características extremamente importantes neste metal é o facto de apresentar uma elevada resistência à corrosão, isto porque, recobre-se de óxidos, protegendo-se da oxidação. É um metal dúctil e maleável, de dureza relativamente baixa, razões pelas quais pode ser maquinado e conformado com relativa facilidade. Pelo facto de apresentar uma boa relação entre peso e resistência, tende cada vez mais a ser utilizado em detrimento de outros metais, numa vasta gama de aplicações. A principal limitação da utilização do alumínio e suas ligas é a sua baixa temperatura de fusão, que limita a temperatura de trabalho das respetivas ligas.

Apresentam-se, na Tabela 8, diversas propriedades do alumínio puro.

Tabela 8: Propriedades do alumínio puro (99.99%) a 25 °C (Marques 2010; Kaufman 1999; "Alumínio" 2014; Hatch 1984).

Geral	
Nome, símbolo, número	Alumínio, Al, 13
Grupo, período, bloco	13, 3, p
Densidade, Dureza	2.7, 2.75 (Escala de Mohs)
Cor	Cinza prateado
Propriedades atómicas	
Massa atómica	26.9815386(8) u
Raio atómico médio	125 pm
Raio atómico calculado	118 pm
Estrutura cristalina	CFC (cúbica de faces centradas)
Propriedades físicas	
Ponto de fusão	933.473 K
Ponto de ebulição	2792 K
Entalpia de fusão	10.79 kJ/mol
Entalpia de vaporização	293.4 kJ/mol
Pressão de vapor	2.42×10^{-6} Pa a 577 K
Calor específico	900 J/kg.K
Condutividade elétrica	377×10^{-6} /mΩ
Condutividade térmica	237 W/m.K
Propriedades mecânicas	
Módulo de elasticidade	70 GPa
Tensão limite de elasticidade a 0.2%	10 MPa
Tensão de rotura	45 MPa
Extensão após rotura (%)	50
Coeficiente de Poisson	0.34

2.4.4 Classificação das ligas de alumínio

De acordo com (Mesquita 1971; Hatch 1984; Marques 2010), o alumínio puro tem uma enorme capacidade de se ligar a quase todos os metais, mas apenas alguns são suscetíveis de produzir ligas com interesse industrial. As ligas de alumínio são provavelmente as ligas mais versáteis de entre todas as ligas passíveis de utilização em fundição e têm um baixo ponto de fusão (650 – 750 °C), traduzindo-se numa grande flexibilidade no processamento das mesmas e permitindo uma menor manutenção dos equipamentos de fusão.

A adição de elementos de liga ao alumínio permite a alteração das propriedades da liga de modo a serem obtidas características mais apropriadas para a sua utilização nos diversos processos de fundição, assim como inculir determinadas características ao produto final como uma maior resistência mecânica, maior resistência à corrosão, entre outros. Os metais de adição mais comum são o silício, magnésio, manganês, zinco e ferro, com teores que, em geral, não vão além dos 10%. As primeiras ligas de alumínio com utilização em fundição foram as ligas de alumínio-cobre e alumínio-silício, sendo que existem atualmente mais de 600 ligas de alumínio reconhecidas industrialmente.

No caso da fundição de ligas de alumínio-magnésio, tipo de liga em foco neste trabalho, aquando da sua fusão e devido à sua grande afinidade com o oxigénio, geralmente o teor em magnésio decresce, sendo normalmente necessário proceder a uma correção da liga (Mesquita 1971).

Na bibliografia é usual encontrar uma divisão nas ligas de alumínio em dois grandes grupos, consoante o seu modo de processamento. As duas definições mais comuns são (Davis 1993):

- Ligas conformadas ou trabalhadas (*wrought alloys*) – destinadas ao fabrico de produtos semiacabados, como laminados planos (placas, chapas), laminados não planos, perfis extrudidos e componentes forjados;
- Ligas fundidas (*casting alloys*) – ligas destinadas ao fabrico de componentes fundidos.

De modo a ser objetivamente mais fácil distinguir e caracterizar as diversas ligas de alumínio, os maiores produtores dos Estados Unidos e com a participação da *Aluminium Association*, concordaram em estabelecer um sistema numérico de quatro dígitos (com um ponto entre o terceiro e quarto dígito) para a designação do alumínio e suas ligas. O primeiro dígito estabelece o elemento principal da liga, o segundo e terceiro indicam os elementos de liga mais importantes e o quarto indica a finalidade. Caso a finalidade seja para peças, lingotes padrão e lingotes com composição variada, o quarto dígito é 0, 1 e 2, respetivamente. Na Tabela 9 é sintetizada a interpretação do primeiro dígito (Hatch 1984; Marques 2010).

Tabela 9: Interpretação do primeiro dígito na designação do alumínio e suas ligas (Marques 2010; Hatch 1984).

Designação	Principal elemento de liga
1XX.X	Alumínio puro (> 99,00 %)
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silício + cobre ou manganês
4XX.X	Silício
5XX.X	Magnésio
6XX.X	Magnésio e Silício
7XX.X	Zinco
8XX.X	Estanho
9XX.X	Outros elementos

Nas ligas de designação do tipo 1XX.X, o segundo e terceiro dígitos indicam o teor mínimo de alumínio presente. Deste modo, na liga 170.0 podemos identificar um teor mínimo de alumínio de 99,70%. Na gama de séries entre a 2XX.X e 8XX.X, o segundo e terceiro dígito não tem um significado numérico, apenas identificando arbitrariamente os elementos de liga presentes. A regra explicitada referente ao quarto dígito é válida para qualquer uma das séries (Marques 2010).

A liga a utilizar na parte prática desta dissertação é a liga AlMg4Zn (norma NBN P21-101), uma liga de alumínio-magnésio, inserindo-se portanto na série 5XX.X. As ligas desta série, nomeadamente a liga AlMg4Zn será alvo de estudo na secção 2.4.5.

2.4.5 Elementos de liga e o seu efeito

Serão em seguida apresentados e analisados os elementos de liga presentes em maior percentagem na composição da liga de alumínio a utilizar na parte prática desta dissertação (AlMg4Zn). A seguinte listagem foi realizada por ordem alfabética e não de importância dos diferentes elementos de liga (Cramer e Covino 2003; Marques 2010):

- **Chumbo**

O chumbo é usado em concentrações superiores a 0,1% de forma a melhorar a maquinabilidade;

- **Cobre**

O cobre aumenta substancialmente a resistência e o endurecimento superficial. Ligas que contém cerca de 4% a 5,5% de cobre tem uma resposta mais eficaz a tratamentos térmicos e apresentam propriedades mecânicas mais elevadas após vazamento. O cobre reduz a resistência à corrosão. Inversamente ao referido na frase anteriormente, baixas concentrações de cobre introduzidas em ligas de alumínio-zinco inibem a corrosão. Reduz a tendência à fissuração a quente e aumenta o potencial para a diminuição do tamanho das dendrites;

- **Ferro**

Aumenta a resistência à fissuração a quente e diminui a adesão às moldações em FI. Com o aumento do teor de ferro as peças têm menor ductilidade. O ferro reage com outros compostos e forma um elevado número de compostos intermetálicos, tais como, FeAl_3 , FeMnAl_6 e αAlFeSi . Estes compostos são insolúveis e são responsáveis pelo aumento da resistência, especialmente a temperaturas elevadas, mas também pela fragilização da microestrutura. À medida que a fração de fases insolúveis aumenta com o aumento do teor de ferro, algumas das propriedades de fundição relacionadas com a alimentação das peças são gravemente afetadas. O ferro participa na formação de escórias juntamente com o magnésio, cromo e outros elementos. Atua como refinador de grão excepto nas ligas alumínio-silício. É responsável pela diminuição da contração;

- **Magnésio**

O magnésio é a base para o aumento da resistência e endurecimento estrutural das ligas de alumínio – silício tratadas termicamente, sendo também usado em ligas mais complexas de alumínio-silício, que contêm cobre, níquel e outros elementos, exatamente pelo mesmo motivo. A fase endurecedora, Mg_2Si , apresenta um limite de solubilidade muito próximo de 0,70% Mg, abaixo do qual não existe mais endurecimento ou começa a haver amaciamento da matriz. As ligas de alumínio-silício de alta resistência apresentam um teor de magnésio que varia entre 0,4% e 0,7%. Ligas binárias de alumínio-magnésio são extremamente usadas em aplicações que requerem um acabamento superficial brilhante, uma excelente resposta a acabamentos químicos, resistência à corrosão e uma relação entre resistência/ductilidade muito atrativa;

- **Manganês**

Normalmente considerado como impureza, o manganês é controlado abaixo de certos valores na maior parte dos vazamentos por gravidade. Nas ligas trabalhadas mecanicamente o manganês é um elemento extremamente importante, uma vez que facilita esse mesmo trabalho mecânico efetuado sobre as ligas. O manganês pode também ser usado para melhorar a resposta de algumas ligas a acabamentos químicos. É responsável também pela diminuição da contração na fundição. Atua como refinador de grão. Nas ligas de Al-Cu e Al-Si melhora a resistência à tração a altas temperaturas. Na presença de ferro pode ter um efeito contrário;

- **Níquel**

O níquel é combinado com o cobre para melhoria das propriedades a temperaturas elevadas, reduzindo também o coeficiente de expansão térmico. Melhora a estabilidade dimensional e a resistência mecânica a temperaturas elevadas. Valores acima de 5% de níquel provocam uma excessiva contração;

- **Silício**

O silício tem um efeito extraordinário nas ligas de alumínio, melhorando quase todas as características de fundição destas ligas. Adições de silício melhoram significativamente a colabilidade, resistência à fissuração a quente e características de alimentação das moldações. Em todas as ligas de alumínio usadas em fundição, são as de alumínio-silício que desempenham o papel mais importante. O aumento de silício na composição de algumas ligas é extremamente importante, pois aumenta a colabilidade permitindo que as peças fundidas tenham espessuras reduzidas e pormenores complicados. As ligas de alumínio-silício são as mais resistentes à fissuração durante a solidificação. O teor de silício presente nas ligas de alumínio-silício varia com as características de solidificação de cada processo. Para processos em que o arrefecimento se dá lentamente, tais como a cera perdida e fundição em areia, o teor varia entre 5% e 7%. Para fundição em coquilha varia entre 8 a 12%. A base para estas recomendações deve-se à relação entre a taxa de arrefecimento, colabilidade e percentagem de eutético durante o processo de solidificação. O silício reduz também o peso específico e o coeficiente de expansão térmico;

- **Titânio**

O titânio é principalmente utilizado como afinador de grão das ligas alumínio utilizadas em fundição, sendo normalmente combinado com pequenas quantidades de boro. Por vezes o titânio é usado em concentrações acima das necessárias para a afinação de grão, com o objetivo de reduzir as fissurações. É também responsável pelo aumento da ductilidade e resistência a tração, diminuindo por outro lado a condutividade térmica;

- **Zinco**

A simples adição de zinco não traz grandes benefícios em termos da fundição das ligas de alumínio, mas quando combinado com o cobre e/ou magnésio, tem como efeito a melhoria das características das ligas para tratamentos térmicos e funciona como agente de envelhecimento natural das peças. Em combinação com o magnésio produz alta resistência ao impacto, alta resistência à tração e excelente ductilidade. Pequenos teores de Zn nas ligas Al-Cu melhoram a maquinabilidade. Alto teor produz maior contração, aumentando a fragilidade a quente (Cramer e Covino 2003; Marques 2010).

2.4.6 A absorção de gases, os seus efeitos e o seu controlo

Durante o tempo em que o alumínio permanece dentro do forno, especialmente após a passagem ao estado líquido, ocorrem diversos fenómenos de natureza física e química que poderão afetar as características dos produtos finais. Pelas suas consequências, os dois fenómenos mais importantes de serem caracterizados são a oxidação do metal e a absorção de hidrogénio. Para atingir elevados padrões de qualidade deverão ser adotadas estratégias de minimização da formação de óxidos assim como de absorção de hidrogénio. Este capítulo será então dedicado ao estudo da influência da formação de óxidos e da absorção de hidrogénio na qualidade final dos produtos de fundição. Serão apresentadas importantes estratégias que deverão ser adotadas para a minimização de defeitos relacionados com esta temática, de modo a promover a obtenção de peças com qualidade superior (Mesquita 1971).

2.4.6.1 Oxidação

Segundo (Hatch 1984; Neto 1985), embora o alumínio seja um dos metais menos nobres, é altamente estável em diversos ambientes oxidantes. No estado sólido, a película de óxido que naturalmente se forma, embora muito fina ($\approx 0.1 \mu\text{m}$), é muito estável e funciona como proteção superficial. Esta forte estabilidade advém do filme contínuo de óxido de alumínio que “cresce” rapidamente à sua superfície, superfície essa que está em contacto com o oxigénio, água e outros elementos suscetíveis de promover a oxidação.

O volume molecular do óxido que se forma é aproximadamente 1,3 vezes maior do que o volume molecular do alumínio consumido na reação de oxidação. A superfície do alumínio está, deste modo, sujeita a tensões de compressão, e rapidamente se “cura” quando danificada, atribuindo a este metal esta característica única. Na presença de ar seco, a película de óxido atinge espessuras entre 2,5 nm e 3 nm. A espessura do filme de óxido aumenta na presença de vapor de água, sendo que à temperatura ambiente e 100% de humidade relativa, a sua espessura é duas vezes superior (Hatch 1984).

A oxidação das ligas de alumínio no estado sólido é favorável, e funciona como proteção do metal. O mesmo não se passa quando a liga se encontra no estado líquido: a oxidação da liga não só tem efeitos nefastos na fusão, como também poderá ter as seguintes consequências (Neto 1985):

- Redução da colabilidade: provocada pela presença de óxidos em suspensão ou óxidos superficiais;
- Redução das propriedades mecânicas das peças: os óxidos traduzem-se grande parte das vezes em inclusões, assim como provocam o aumento do teor de gases devido à hidratação desses mesmos óxidos;
- Redução da maquinabilidade: provocada pela presença de pontos duros, originados pela existência de alumina α ou óxidos de outros elementos.

Quando o alumínio se encontra no estado líquido e ao fim de algumas horas, a película de óxido atinge elevadas espessuras ($\approx 10 \mu\text{m}$), mas devido à presença de diversos elementos de liga, de eventuais agitações do banho e até de possíveis fontes de hidratação, formam-se óxidos com características diferentes da alumina, provocando uma diminuição do poder protetor da película de óxido (Neto 1985).

De acordo com (Neto 1985), de entre os elementos de liga presentes, a ação individual de cada um é diferente, podendo promover ou despromover a oxidação, conforme o caso. A título de exemplo, o ferro, o zinco e o manganês, embora não alterem a natureza da película de óxido que se forma (Al_2O_3), incrementam ligeiramente a oxidação a altas temperaturas. O berílio, quando usado em quantidades bastante reduzidas ($\approx 0.005\%$) reduz para 1/10 as perdas por oxidação, isto devido à formação de uma película de BeO . Por outro lado, a presença de magnésio como elemento de liga favorece a oxidação, alterando a constituição da película de óxido para $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{MgO}$.

Destacam-se em seguida algumas medidas que poderão para minimizar a oxidação das ligas de alumínio no estado líquido (Neto 1985):

- Utilização de equipamentos de fusão com a menor superfície de exposição possível;
- Adoção de técnicas de fusão rápidas;
- Utilização de cargas limpas e secas devido à catalisação dos fenómenos de oxidação na presença de humidade;
- Utilização de cadinhos, ferramentas e fluxos convenientemente limpos e secos.

2.4.6.2 Hidrogénio

De acordo com (ASM International 1998; Hatch 1984), existem diversos gases solúveis no alumínio líquido (e suas ligas), sendo o hidrogénio um dos principais, especialmente no estado líquido. Dos gases que poderão estar em contacto com o metal, o hidrogénio é especialmente importante devido à sua direta relação com a origem de determinados defeitos nos produtos de fundição.

Na Tabela 10 são apresentadas concentrações de diversos gases tipicamente presentes no alumínio e suas ligas, sendo possível destacar os elevados teores em hidrogénio (Neto 1985).

Tabela 10: Teores (em $\text{cm}^3/100\text{gr}$) de diversos gases presentes em provetes de alumínio (Neto 1985).

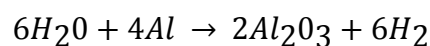
	CO_2	CO	N_2	CH_4	H_2
Proвете de alumínio gaseificado com H_2 (densidade 2,66)	0,04	0,11	0,08	0,06	1,02
Proвете de alumínio gaseificado com $\text{N}_2 + \text{CCl}_4$ (densidade 2,685)	0,04	0,12	0,06	0,02	0,80
Proвете de alumínio gaseificado mais tempo com $\text{N}_2 + \text{CCl}_4$ (densidade 2,706)	0,04	0,13	0,06	0,01	0,54

Segundo (Davis 1993; Neto 1985; ASM International 1998), existem diversas potenciais fontes de hidrogénio das quais é possível destacar:

- Atmosfera dos fornos de fusão: caso sejam, por exemplo, utilizados fornos a gás natural ou fuel óleo, muitas vezes pode surgir hidrogénio livre devido a uma combustão incompleta do combustível utilizado. A utilização de fornos de resistência elétrica é deste modo uma prática aconselhável;
- Cargas dos fornos: lingotes e retornos de fundição utilizados como alimentação dos fornos poderão conter óxidos, areia, óleos, sujidades e outros elementos, que constituem potenciais fontes de hidrogénio pela redução de compostos orgânicos ou pela decomposição do vapor de água contido na mistura;
- Fluxos: diversos fluxos utilizados nos tratamentos das ligas são higroscópicos. Fluxos húmidos podem provocar a captação de hidrogénio através da decomposição do vapor de água;
- Presença de determinados elementos de liga: a presença de alguns elementos de liga, nomeadamente o magnésio, pode afetar a quantidade de hidrogénio absorvido através da formação de produtos de reação que contêm uma baixa resistência à difusão do hidrogénio na mistura;
- Componentes externos: escumadeiras e outras ferramentas utilizadas poderão conter óxidos e resíduos de fluxos que constituem uma potencial fonte de contaminação caso estas ferramentas não estejam devidamente limpas.

É importante destacar que o vapor de água é o composto que maior quantidade de hidrogénio fornece à liga, causando o efeito nefasto que é amplamente conhecido. De qualquer modo, na maioria dos casos há simultaneamente absorção de hidrogénio e oxidação.

De acordo com (Neto 1985), a partir do vapor de água, a reação que dá origem à dissolução do hidrogénio no alumínio é do tipo:



O efeito do hidrogénio dissolvido manifesta-se durante a solidificação da liga devido à queda brusca de solubilidade que se verifica na mudança de fase, como se observa na Figura 22. Para uma melhor perceção, é importante caracterizar convenientemente a solubilidade do hidrogénio no estado líquido, no estado sólido, assim como na passagem entre os dois estados (ASM International 1998).

De acordo com (Hatch 1984; ASM International 1998) solubilidade do hidrogénio tem uma relação direta com a temperatura e com a raiz quadrada da pressão. A Figura 22 apresenta a relação entre a solubilidade do hidrogénio e o estado em que o alumínio se encontra, sendo importante referir que dependendo dos elementos de liga presentes, a solubilidade do hidrogénio pode variar ligeiramente.

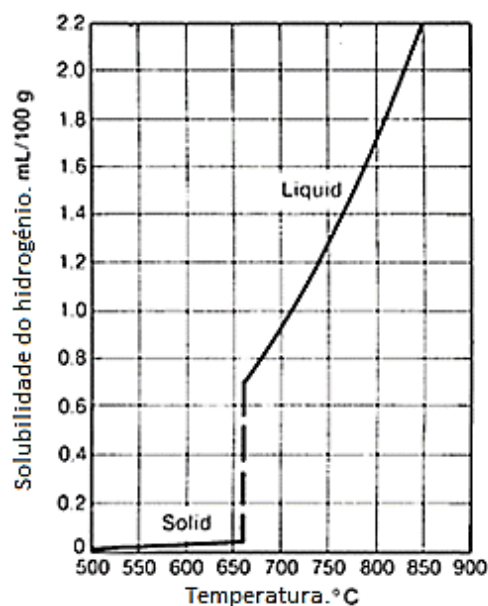


Figura 22: Solubilidade do hidrogênio no alumínio em função da temperatura do alumínio e respetivo estado (ASM International 1998).

Facilmente se conclui que à medida a temperatura decresce, a solubilidade do hidrogênio no alumínio diminui consideravelmente, nomeadamente na passagem do estado líquido ao estado sólido. Durante o arrefecimento e solidificação do alumínio, e muito devido à diferença abrupta de solubilidade entre os dois estados (0,65 mL/100g e 0,034 mL/100g, no instante imediatamente abaixo e a cima da mudança do estado líquido para o estado sólido, respetivamente), o hidrogênio dissolvido em excesso tem tendência a precipitar, potenciando a formação de alguns defeitos, principalmente porosidades gasosas (Hatch 1984; ASM International 1998).

Caso haja um estágio prolongado a temperaturas muito próximas da temperatura de fusão, é possível reduzir em grande parte o teor de hidrogênio dissolvido, e caso a solidificação seja extremamente lenta, o hidrogênio tem tendência a abandonar o alumínio praticamente na sua totalidade. O grande inconveniente é a necessidade de um estágio demasiado prologado da liga no forno (Neto 1985).

De acordo com (Neto 1985), para um determinado teor em hidrogênio, os poros gasosos são mais abundantes e de maiores dimensões quanto mais grosseira for a estrutura de solidificação da liga, o que significa que para elevadas taxas de arrefecimento, as porosidades gasosas são menos significativas e mais dispersas. A libertação de hidrogênio na frente de solidificação dá-se para as cavidades interdendríticas, pelo que caso uma liga tenha tendência ao aparecimento de microrechupes, haverá dificuldade extra no preenchimento destas cavidades, resultando numa tendência acrescida à formação deste tipo de defeitos.

Segundo (ASM International 1998), são necessárias concentrações médias a elevadas de hidrogênio para que haja a ocorrência de defeitos na solidificação. Concentrações da ordem de 0,3 mL/100g provocam, regra geral, a precipitação do hidrogênio. Para concentrações até 0,15 mL/100g não é comum serem encontrados defeitos relacionados com o conteúdo excessivo de hidrogênio.

De um modo geral, a presença de hidrogénio provoca uma redução das propriedades mecânicas da liga fundida, por efeito duplo. Ou seja, pela redução da área resistente assim como pelo aumento da concentração de tensões. O maior impacto nas propriedades mecânicas é geralmente registado na tenacidade, resistência à fadiga e resistência mecânica dos fundidos (ASM International 1998).

Na Figura 23 está graficamente representada a relação entre a porosidade e o conteúdo de hidrogénio presente na liga, assim como o efeito da porosidade na resistência mecânica de diversas ligas de alumínio. De referir que não foram encontrados dados relativos à liga em estudo neste trabalho.

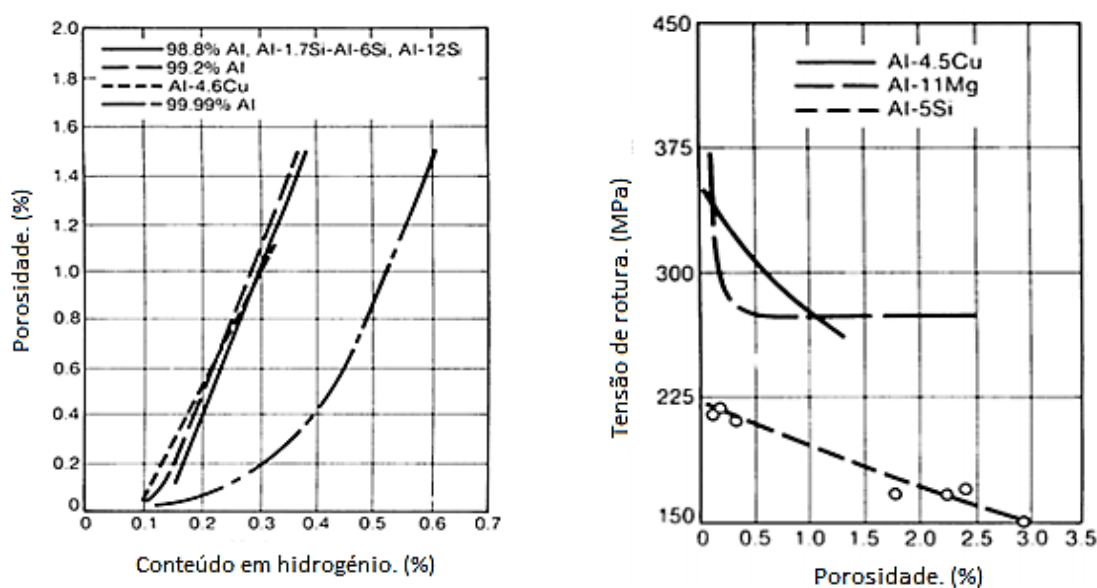


Figura 23: Porosidade em função do conteúdo em hidrogénio para o alumínio e algumas das suas ligas (à esquerda); Efeito do conteúdo em hidrogénio na tensão de rotura para diversas ligas de alumínio (à direita) (ASM International 1998).

Tal como pode ser observado na figura anterior, as porosidades originadas por um conteúdo de hidrogénio demasiado elevado diminuem consideravelmente a resistência mecânica das peças fundidas e irão dificultar posteriores tratamentos térmicos superficiais como a cromagem e anodização. É, contudo, praticamente impossível que não haja qualquer absorção de hidrogénio pelo que deverá ser feita, antes do vazamento, uma operação de degaseificação da liga fundida, que será abordada na secção 2.4.6.2.1 (Mesquita 1971).

O hidrogénio pode nem sempre ser indesejável. A precipitação do hidrogénio altera grande parte das vezes a forma e distribuição de certas porosidades relacionadas com as contrações do metal, em zonas de fraca alimentação. Os defeitos relacionados com as contrações do metal poderão ser ainda mais danosos para as propriedades mecânicas das peças fundidas. Deste modo, em casos muito específicos, é introduzido intencionalmente hidrogénio em concentrações bem determinadas e compatíveis com os requisitos das peças, de modo a que

os defeitos de fundição em determinadas zonas sejam desviados, promovendo a integridade superficial do produto de fundição (Davis 1993).

É importante destacar que sempre que possível, devem ser encontradas as causas dos defeitos, de modo a corrigi-los, não sendo uma prática aconselhável ignorar ou tentar contornar os mesmos.

2.4.6.2.1 Controlo do teor em hidrogénio - desgaseificação

De acordo com (Davis 1993), os níveis de hidrogénio dissolvido podem ser reduzidos através de diversas técnicas. Em qualquer processo de fundição, o ideal seria que a desgaseificação fosse feita de modo natural. Infelizmente, para a sua realização seria necessário um estágio demasiado prolongado da liga no forno, com prejuízo para a produtividade. Nem sempre isto é possível, e por esse motivo é necessário recorrer a processos que permitam realizar a desgaseificação da liga, minimizando os defeitos relacionados com os gases dissolvidos na mesma, especialmente o hidrogénio. Adicionalmente, a desgaseificação também poderá melhorar a dispersão de partículas não metálicas (óxidos) no banho. Fundamentalmente, a desgaseificação consegue-se por via mecânica ou química, sendo na maior parte dos casos por via mista.

O método mais utilizado para a desgaseificação do alumínio é por meio de um rotor desgaseificador (*mechanical mixer degassing*), também designado de desgaseificador rotativo. O princípio de funcionamento deste método é relativamente simples e consiste na ação de um fluxo de gás insolúvel no alumínio, que captura e arrasta por ação mecânica os gases e outras partículas como inclusões de óxidos para a superfície do banho (Marques 2010).

Na Figura 24 está esquematicamente representado o “mecanismo” que promove a desgaseificação e a limpeza das inclusões nos banhos.

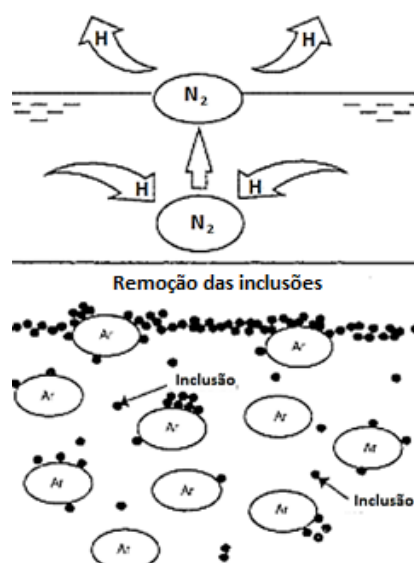


Figura 24: Representação simbólica do mecanismo de desgaseificação (Marques 2010)

Na Figura 25, encontra-se representado o princípio de funcionamento de um rotor desgaseificador.

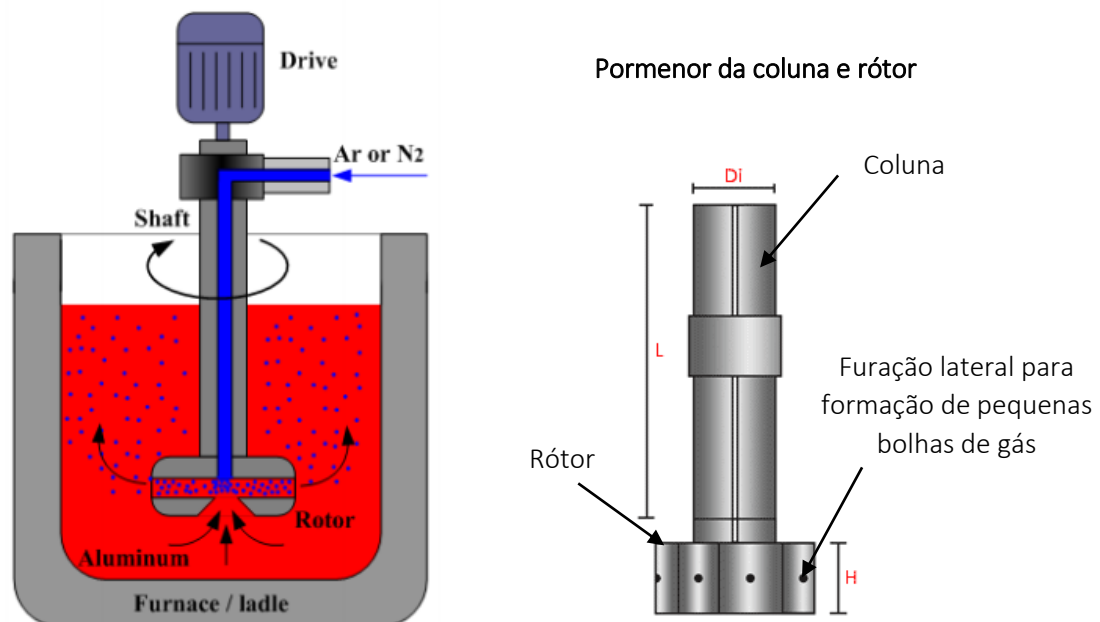


Figura 25: Princípio de funcionamento de um desgaseificador mecânico rotativo com pormenor da coluna e rotor (Marques 2010).

Este sistema possui geralmente baixos custos de implementação e é utilizado, regra geral, em fornos de cadinho até 500 kg. O sistema rotativo é composto por uma coluna e um rotor, ambos com um tratamento especial contra a oxidação, e o rotor possui uma furação lateral para formação de pequenas bolhas de gás. Poderão ser utilizadas colunas e róticos em grafite, que devido à sua porosidade, permitem produzir micro bolhas que favorecem uma distribuição mais regular do gás, promovendo uma maior eficiência da desgaseificação. De acordo com as necessidades, poderão ser adquiridos sistemas que permitem o controlo do tamanho das bolhas de gás, sistemas naturalmente com custos mais elevados (Metgraphite 2014).

Tipo de gás utilizado

De acordo com (Marques 2010), antigamente, o gás mais utilizado para a desgaseificação do hidrogénio era o cloro, normalmente sob a forma de hexacloroetano (C_2Cl_6). Uma vez que a reação química formava compostos tóxicos prejudiciais ao ambiente e à saúde dos operários, e muitas vezes provocava um efeito corrosivo na superfície das peças, a utilização do cloro foi abandonada praticamente na totalidade devido à imposição de diversas normativas de segurança. Hoje em dia, a desgaseificação é feita essencialmente com o uso de argón, azoto, ou outros gases inertes que não apresentam reação com o alumínio líquido. Embora não apresentem toxicidade, os gases inertes não apresentam uma eficiência tão elevada como o cloro, isto porque no caso da utilização do último, os cloretos formados “molham” melhor as inclusões não-metálicas, fazendo com que estas sejam arrastadas para a superfície do banho através da ação das bolhas de gás.

As bolhas que se formam e que promovem o movimento de arrasto do hidrogénio para a superfície do metal poderão ser de maior ou menor diâmetro. Do mesmo modo, poderão ser utilizadas concentrações de gás de diferentes valores. A eficiência na remoção do hidrogénio depende em larga escala do diâmetro das respetivas bolhas e da concentração do gás (Marques 2010).

A Figura 26 apresenta a relação entre a eficiência do tratamento de desgaseificação em função do diâmetro das bolhas e da concentração do gás. É possível concluir que para a mesma concentração de gás, a diminuição do diâmetro das bolhas conduz a uma maior eficiência do tratamento. Conclui-se também que a utilização de concentrações de gás mais elevadas permitirá uma desgaseificação mais eficiente.

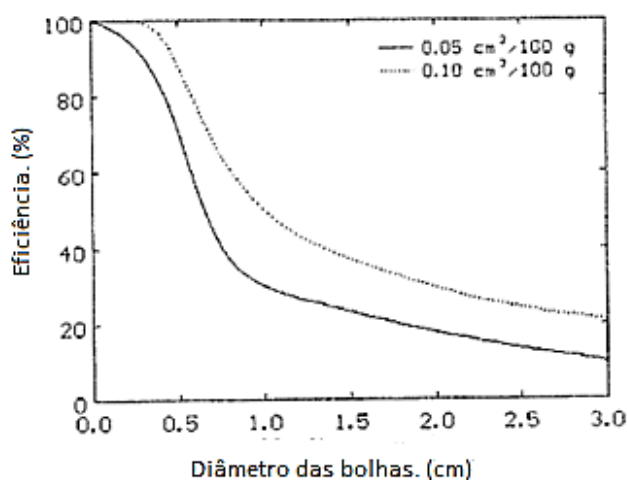


Figura 26: Remoção do hidrogénio em função do diâmetro das bolhas para duas concentrações diferentes de gás (Marques 2010).

Técnica de fusão duplex

Devido à necessidade da realização da desgaseificação da liga de alumínio, a tendência atual consiste na utilização de dois fornos em série, denominado de processo de fusão duplex. Deste modo, a fusão de liga é realizada num primeiro forno e posteriormente é feita a transferência da liga fundida para um segundo forno, denominado de forno de manutenção, onde é feita a desgaseificação. O forno de manutenção tem como principal função manter o metal fundido a uma temperatura constante (ligeiramente a cima do ponto de fusão). No caso da FCBP, o forno de manutenção encontra-se geralmente situado diretamente por baixo da coquilha, permitindo a ascensão do metal fundido diretamente para a cavidade que irá dar origem à peça.

De acordo com (Reeve 1961), para além da desgaseificação propriamente dita da liga, a utilização de processos de fusão duplex permite elevar as taxas de produção, em grande parte porque através desta metodologia é possível uma alimentação contínua do primeiro forno de fusão, enquanto que a desgaseificação e o processo de fundição decorre normalmente na segunda estação (onde se encontra o forno de manutenção).

2.4.7 Acabamento de peças em ligas de alumínio

De acordo com (Santos 2012), “embora existam materiais com capacidade para resistir a ambientes corrosivos sem qualquer tipo de proteção, outros há em que tal não acontece”. Os tratamentos de proteção superficial dos metais denotam um interesse bastante relevante, na medida em que permitem melhorar diversas propriedades dos metais, nomeadamente a resistência à corrosão, tornando-os mais aptos às diversas aplicações em causa. De acordo com a bibliografia, existem diversos processos de proteção contra a corrosão superficial das ligas de alumínio, dos quais os mais comuns são:

- Anodização;
- Pintura;
- Cromagem;
- *Physical vapor deposition* (PVD).

Dos métodos anteriormente listados, a pintura e a anodização são os dois métodos adotados no caso da STA para o revestimento dos produtos de fundição em ligas de alumínio. No caso dos puxadores em alumínio obtidos por FI, a prática usual na STA é realizar a sua pintura, já que estes produtos de fundição não podem ser sujeitos a um tratamento de anodização, caso contrário não apresentariam a cor característica do alumínio mas sim uma cor acinzentada (inviabilizando a sua comercialização). Este facto deve-se principalmente aos elevados teores em silício presentes nas ligas de alumínio utilizadas na FI. Por outro lado, as peças provenientes de FI têm tipicamente defeitos superficiais que após anodização têm tendência a se tornarem visíveis. Relativamente a puxadores obtidos por FCBP, FCG ou FCR, estes já são suscetíveis de serem anodizados, apresentando uma elevada resistência à corrosão e um acabamento superficial de excelência.

Na Figura 27 está representado um produto obtido por FCR com anodização posterior, assim como o mesmo puxador obtido por FI (sem qualquer tratamento superficial).



Figura 27: Puxador obtido por FCR com posterior anodização (à esquerda); Puxador obtido por FI (sem tratamento superficial), ambos produtos de fundição da STA.

2.4.7.1 Anodização

Segundo (Fontinha e Salta 2004; Araújo 2012), caixilharias de janelas, puxadores de portas e dobradiças são produtos tendencialmente em alumínio, onde o processo de anodização tem um papel fulcral. É de extrema importância prolongar a vida útil destes produtos assim como lhes atribuir boas características estéticas, por longos períodos de tempo. A aplicação do alumínio e suas ligas aumentou significativamente nos últimos 50 anos, não só devido à otimização dos processos de produção, mas muito devido ao desenvolvimento de processos de tratamento superficial, onde se engloba a anodização. É possível, deste modo, aumentar de uma forma inequívoca a resistência à corrosão dos produtos em alumínio. Dados estatísticos de 2002 comprovam que na Europa foram anodizadas cerca de 672.000 t de alumínio, nesse mesmo ano.

Segundo (Araújo 2012; Martins 2012) as grandes vantagens da anodização são:

- Durabilidade: os produtos anodizados tem uma vida útil superior em termos de resistência à corrosão e resistência ao desgaste;
- Estabilidade e cor: permite uma forte retenção da cor característica da peça por longos períodos de tempo devido à grande estabilidade da camada anódica aos raios ultravioleta e a elementos agressores;
- Facilidade de limpeza das superfícies com água e sabão;
- Estética superior: os produtos anodizados são esteticamente bastante apelativos, sendo possível um vasto leque de polimentos e colorações;
- Segurança: a anodização é estável do ponto de vista químico, não se decompõe.

A importância da utilização de produtos anodizados torna-se bastante relevante no caso de estes estarem sujeitos a ambientes tendencialmente corrosivos. São exemplos deste tipo de ambientes as zonas muito industrializadas assim como as zonas costeiras, já que na presença de atmosferas marítimas é natural que o processo de corrosão se intensifique.

De acordo com (Santos 2012; Fontinha e Salta 2004), o alumínio quando exposto ao ar e a outras eventuais substâncias corrosivas, reage muito rapidamente com o oxigénio, formando-se na superfície uma camada muito fina de óxido de alumínio (alumina - Al_2O_3), muito compacta e aderente. Na presença de humidade, esta camada é mais espessa e na sua superfície existe uma camada 'hidratada' (por vezes mais porosa), de óxidos cristalinos e hidróxidos de alumínio (boemite $\text{AlO}(\text{OH})$, bayerite $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{Al}(\text{OH})_3$).

Conforme as condições de formação, esta camada é muito aderente e compacta, atingindo espessuras até várias dezenas de nanómetros, formando uma 'barreira' que protege eficazmente o alumínio da corrosão. Esta camada é estável na gama de pH entre 4 e 8,5, sendo que fora desta gama, o óxido tende a dissolver-se, podendo ocorrer a corrosão generalizada do alumínio (Fontinha e Salta 2004).

Segundo (Fontinha e Salta 2004; Fontinha, Salta, e Vítor 2006), as velocidades de corrosão do alumínio não anodizado na atmosfera tendem a diminuir ao longo do tempo de exposição, isto porque os produtos de corrosão formados vão-se acumulando na superfície do metal,

dificultando o ‘alastrar’ da corrosão. Geralmente a velocidade de corrosão não ultrapassa os 3 $\mu\text{m}/\text{ano}$ a 4 $\mu\text{m}/\text{ano}$, em termos de perda de espessura global ou 10 $\mu\text{m}/\text{ano}$ a 20 $\mu\text{m}/\text{ano}$, em termos de penetração média das picadas.

Embora a corrosão atmosférica tenha pouco impacto nas propriedades mecânicas das peças (inferior a 10%), do ponto de vista estético a superfície do metal sofre alterações muito significativas como perda de brilho, escurecimento, formação de maclas e de picadas. Todas as alterações que foram mencionadas anteriormente poderão ser minimizadas através do recurso à anodização.

A resistência à corrosão de um produto anodizado depende fundamentalmente de dois parâmetros: a espessura da camada anodizada e a qualidade da sua colmatagem (Fontinha e Salta 2004)

É importante estabelecer uma relação entre a espessura da camada anodizada e a resistência à corrosão associada. Na Figura 28 é apresentada a influência que a espessura da camada anodizada pode ter na resistência à corrosão de uma liga de alumínio, em presença de diferentes ambientes.

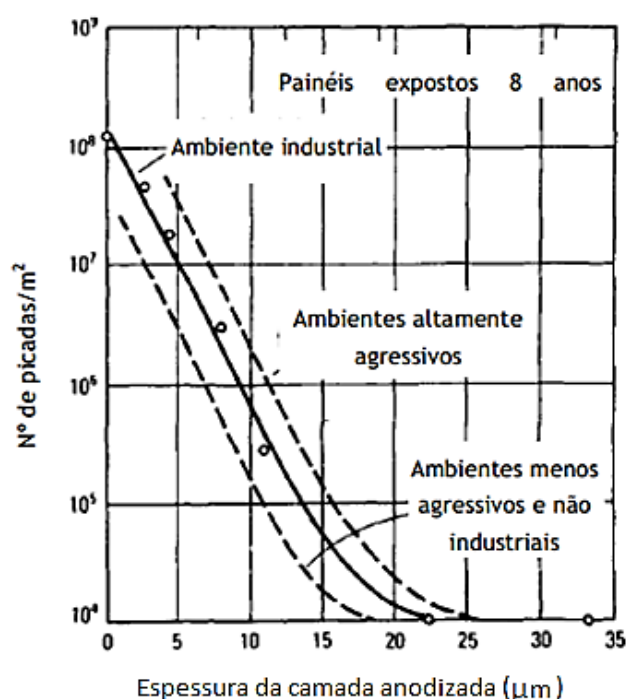


Figura 28: Influência da espessura da camada anodizada, na resistência à corrosão em três ambientes distintos, ao final de 8 anos, em ligas de alumínio (Santos 2012).

Como é possível constatar, a espessura da camada anodizada tem uma forte relação com a resistência à corrosão, e esta deve ser estabelecida de acordo com o material a ser anodizado, assim como as exigências estabelecidas pelo cliente. Para produtos a trabalhar em locais bastante corrosivos ou em que seja esperado/exigido um ciclo de vida mais longo, a espessura da camada anodizada deverá ser superior. No entanto, vários estudos revelam que existe uma gama ótima de espessuras para que a camada anodizada seja eficaz, situando-se entre os 15 μm e os 30 μm . Espessuras superiores a 30 μm , na prática, não introduzem melhorias

significativas na resistência à corrosão, podendo até ser prejudiciais, por serem mais vulneráveis a alguns defeitos de fabrico como a baixa dureza (Fontinha e Salta 2004).

A classificação das espessuras da camada anódica ocorreu pela primeira vez em Inglaterra, normalizada pela *British Standard 1615:1972*. Esta classificação sofreu diversas alterações ao longo dos anos e ainda hoje é utilizada. A referência em Portugal e na Europa é a norma: *NP EN ISO 7599:2010, Anodização do alumínio e suas ligas*. A classificação dos revestimentos é feita de acordo com o valor mínimo de espessura média admissível no revestimento (espessura média mínima), sendo que a espessura local mínima nunca pode ser inferior a 80% da espessura média mínima (Brace e Sheasby 1960; Araújo 2012). Na Tabela 11 são apresentadas diversas classes de espessuras dos revestimentos de anodização de acordo com a norma europeia.

Tabela 11: Classes de espessuras dos revestimentos de anodização (Araújo 2012).

Classe	Espessura média mínima (μm)	Espessura local mínima (μm)
AA 5	5,0	4
AA 10	10,0	8
AA 15	15,0	12
AA 20	20,0	16
AA 25	25,0	20

2.4.7.1.1 Anodização na STA

Na STA, os puxadores obtidos por FCR, são posteriormente anodizados e têm uma espessura de anodização em média com 16 μm , situando-se na gama de espessuras de anodização considerada como ótima. A espessura de anodização está também diretamente relacionada com a tonalidade e brilho apresentado pelo puxador. Algumas discrepâncias no valor da camada de anodização podem simplesmente inviabilizar a comercialização dos produtos ou no caso da sua venda, levarem a reclamações devido à elevada importância da componente estética destes produtos. O processo deverá assim estar controlado de modo a que as espessuras dos revestimentos sejam constantes, minimizando a possibilidade de rejeição do produto tanto por parte do cliente como por parte do controlo de qualidade existente na STA (Araújo 2012).

Tipos de anodização

De acordo com (Santos 2012; Martins 2012), existem diversos tipos de anodizações que diferem entre si essencialmente no tipo banho utilizado. Grosso modo, existem dois grandes grupos:

- Anodização em banho de óxido de crómio (Cr_2O_3);
- Anodização em banho de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

As anodizações sulfúricas com corrente contínua são as mais vulgares na indústria, as mais económicas e permitem a atribuição de coloração (antes da colmatagem). A anodização em

banho de ácido sulfúrico pode ser realizada à temperatura ambiente ou a baixa temperatura, resultando num revestimento convencional (*conventional anodizing*) ou revestimento duro (*hardcoat anodizing*), respectivamente.

Tendo em conta que o método utilizado pela STA é a anodização em banho de ácido sulfúrico à temperatura ambiente, este será o método analisado.

A reação anódica que ocorre pode ser descrita através da reação:



Os elementos de liga têm uma grande influência nos resultados obtidos após anodização. Na presença de determinadas ligas, como por exemplo as ligas de alumínio-silício, a aplicação do processo revela resultados insatisfatórios. No caso das ligas de alumínio-magnésio, tipo de liga com aplicação nesta dissertação, a anodização demonstra ser uma ferramenta eficaz contra a corrosão, mas são ligas onde a aplicação de coloração não revela resultados satisfatórios. É necessário, deste modo, uma comparação dos resultados típicos na anodização de diferentes ligas de alumínio. Uma comparação dos resultados da anodização e anodização + coloração de diferentes ligas usadas em fundição é apresentada na Tabela 12 (Marques 2010).

Tabela 12: Comparação dos resultados da anodização e anodização + coloração de diferentes ligas usadas em fundição (Marques 2010).

Liga	Anodização contra a corrosão	Anodização e coloração	Anodização brilhante
Al puro	Excelente	Excelente	Excelente
Al-Cu	Boa	Excelente	Fraca
Al-Si-Cu/Mg	Boa	Fraca (*)	Imprópria
Al-Si	Fraca	Imprópria	Imprópria
Al-Mg	Excelente	Fraca (**)	Imprópria
Al-Zn	Fraca	Imprópria	Imprópria

(*) – Própria para cores escuras

(**) – As condições de anodização devem ser cuidadosamente controladas

Segundo (Marques 2010), na integração do alumínio em diferentes aplicações, a corrosão galvânica pode constituir um problema devido à proximidade do alumínio com outros metais de construção comuns como o aço, cobre, titânio, níquel, entre outros. Nestas circunstâncias, e havendo um meio condutor, o alumínio pode ter tendência a sofrer corrosão galvânica muito devido ao seu baixo potencial eletroquímico. A diferença entre os valores dos potenciais eletroquímicos dos vários metais dá-nos uma forte indicação sobre a intensidade da corrosão galvânica, assim como qual dos materiais tem tendência a ser corroído. Deste modo, caso os potenciais eletroquímicos de diferentes metais sejam muito distantes, existe uma forte probabilidade de na presença de um meio condutor ocorrer corrosão galvânica (do material menos nobre).

Os potenciais eletroquímicos de diversos metais são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Potenciais eletroquímicos de vários metais de utilização comum em relação a um eletrodo de referência (Santos 2012).

Metal	Potencial (V)
Magnésio puro	-1,75
Liga de magnésio (6% Al, 3% Zn, 0,15% Mn)	-1,60
Zinco	-1,10
Liga de alumínio (5% Zn)	-1,05
Alumínio puro	-0,80
Aço estrutural (limpo e polido)	-0,50/-0,80
Aço estrutural (oxidado)	-0,40/-0,55
Cobre, latão, bronze	-0,20

A adição de determinados elementos de liga permite a alteração do potencial eletroquímico, podendo este tornar-se mais ou menos negativo consoante o elemento de liga utilizado. Como exemplo, o magnésio, o zinco e o silício tendem a influenciar o potencial químico no sentido anódico (negativo), enquanto que o cobre permite tornar o potencial eletroquímico mais catódico.

Na Tabela 14 são apresentados os potenciais eletroquímicos de ligas de alumínio de diversas séries. Tal como é possível constatar, os elementos de liga têm influência no potencial eletroquímico. A liga AlMg4Zn, que será estudada nesta dissertação, enquadra-se nas ligas de alumínio da série 513.X e poderá ser aproximada pelas ligas destacadas a cor verde na Tabela 14.

Tabela 14: Potencias eletroquímicos de ligas de fundição em alumínio de diferentes séries (S – areia; P – permanente) (Davis 1993).

Liga de alumínio	Tipo de moldação	Potencial [V]
208.0	S	-0,77
238.0	P	-0,74
295.0	S ou P	-0,70
296.0	S ou P	-0,71
308.0	P	-0,75
319.0	S	-0,81
355.0	S ou P	-0,78
356.0	S ou P	-0,82
443.0	S	-0,83
514.0	S	-0,87
520.0	S ou P	-0,89
710.0	S	-0,99

Colmatação

De acordo com (Araújo 2012), a operação de colmatação é de grande importância no ciclo de anodização do alumínio, no sentido em que permite aumentar a durabilidade da camada de óxido devido ao preenchimento dos poros com compostos mais complexos e volumosos, garantindo a sua estanquicidade. No caso de ser necessária a pintura dos produtos em alumínio anodizado de modo a lhe atribuir uma determinada coloração, a colmatação permite que a tonalidade do revestimento perdure por um tempo superior. Para este caso, a colmatação é feita após a coloração.

Na STA, é utilizado o processo de colmatação com água em ebulição, mas existem diversos outros processos além deste, dos quais se destacam (Araújo 2012):

- Colmatação com vapor saturado;
- Colmatação com sais de níquel;
- Colmatação a frio;
- Colmatação por polimerização de matérias plásticas.

Na Figura 29 encontra-se apresentada a camada anodizada com a distinção gráfica entre um poro colmatado e um não colmatado.

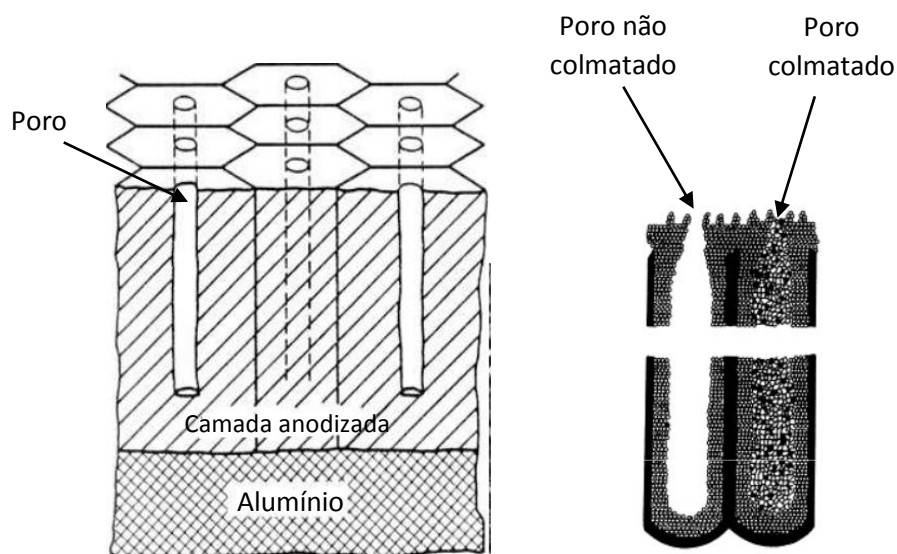


Figura 29: Princípio de funcionamento da colmatação: Poro colmatado e poro não colmatado (Fernandes 2014).

2.4.7.2 Controlo de qualidade das peças anodizadas

De acordo com (Martins 2012), o controlo de qualidade é o passo final do processo e consiste numa etapa de extrema importância, na medida em que tem o objetivo de garantir a qualidade das superfícies das peças anodizadas que terão de cumprir todos os requisitos necessários para os produtos serem comercializados com sucesso. Existem, grosso modo, dois ensaios principais que deverão ser utilizados, sendo que em cada tipo de ensaio existem métodos diversos que permitem a verificação necessária.

Os dois tipos de ensaios que deverão ser realizados são o ensaio de espessura e o ensaio colmatagem. Ambos os ensaios deverão ser realizados em ambiente seco e com humidade controlada, de modo a serem obtidos resultados que permitam tirar conclusões com o menor erro possível.

1) Ensaio de medição de espessura:

Métodos destrutivos:

- Por microscopia ótica (corte ótico de referência). A medição é realizada utilizando o microscópio de reflexão;
- Pelo método gravimétrico (perda de massa).

Métodos não destrutivos:

- Por passagem de correntes de Foucault (o mais utilizado) no alumínio subjacente à camada anodizada, e a medição da reação destas correntes com o auxílio de uma sonda que é colocada sobre a superfície anodizada.

2) Ensaios de colmatagem:

Ensaio de Gota: o método baseia-se na ação de um ácido sobre uma parte da superfície da amostra anodizada, que foi previamente desengordurada. Através da aplicação de um corante, e dependendo da coloração que é apresentada, é possível comparar a mancha obtida com uma gama de padrões, concluindo se a colmatagem é boa ou não.

Além dos dois ensaios previamente apresentados, poderão ser realizados diversos ensaios extras, dependendo do grau de exigência que está inerente.

2.4.5 Caracterização da liga de alumínio utilizada nos puxadores da STA: A-G4Z (NF 57-702) equivalente a AlMg4Zn (NBN P21-101)

A liga de alumínio que é atualmente utilizada na STA para o fabrico de puxadores de portas através dos processos de FCG e FCR é a liga de fundição AlMg4Zn, designação pela norma belga “NBN P21-101”, ou a equivalente A-G4Z, pela norma francesa “NF 57-702”. Esta será também a liga a utilizar na FCBP, sendo por isso importante a sua análise e caracterização.

A liga AlMg4Zn é apropriada para utilização em fundição em moldações permanentes assim como na fundição em areia e enquadra-se nas ligas de alumínio da série 5XX.X, mais especificamente 513.X (Cverna 2001). Por este motivo, serão descritas algumas propriedades típicas das ligas da série 5XX.X.

Segundo (Kaufman 1999), nas ligas de alumínio da série 5XX.X o magnésio é o principal elemento de liga e constitui um dos elementos mais efetivos no seu endurecimento. Quando utilizado como elemento de liga principal, ou em conjunto com o manganês, o resultado é a obtenção de ligas com dureza superior e com resistência mecânica moderada a alta. De modo a provocar o endurecimento do alumínio, o magnésio é considerado mais efetivo do que o manganês e pode ser, regra geral, adicionado em elevadas quantidades (até 15%). Uma das características de grande relevância das ligas da série 5XX.X é sem dúvida a elevada resistência à corrosão que estas possuem, fazendo com que estas sejam utilizadas em grande escala em diversos componentes de construção civil, equipamentos de processamento e armazenamento de produtos químicos, no setor alimentar e aplicações envolvendo a exposição a ambientes marítimos.

As principais características das ligas da série 5XX.X são então (Kaufman 1999):

- Excelente resistência à corrosão;
- Elevada dureza;
- Fácil soldadura através de diversas técnicas (até espessuras de 20 cm);
- Endurecíveis por tratamento térmico;
- Resistência mecânica moderada a elevada;
- Tensão de rotura entre 125 e 350 MPa.

Devido ao elevado teor em magnésio das ligas desta série, estas poderão ter a tendência a sofrer oxidação e a absorver hidrogénio durante a fusão, motivo pelo qual é importante adotar estratégias de minimização destes dois efeitos indesejados, anteriormente referidas nesta dissertação (Torre 2004).

Depois de analisadas algumas propriedades típicas das ligas da série 5XX.X, é importante caracterizar especificamente a liga em estudo. Por este motivo, serão apresentados os elementos de liga principais presentes na composição da liga de fundição AlMg4Zn, assim como algumas propriedades físicas e mecânicas da mesma.

A Tabela 15 apresenta os principais elementos de liga presentes na composição da liga AlMg4Zn, assim como a respetiva percentagem de cada elemento.

Tabela 15: Composição da liga AlMg4Zn em termos de elementos de liga.

Elementos de liga	Percentagem presente na liga
Mg	3,5 a 4,5
Zn	0,90 a 1,45
Si	$\leq 0,5$
Fe	$\leq 0,5$
Mn	$\leq 0,30$
Ti	0,20
Cu	$\leq 0,10$
Ni	0,05
Pb	0,05

Pela análise da composição da liga em termos dos seus elementos de liga, e de acordo com o referido na secção 2.4.5, é possível esperar as seguintes propriedades (Cramer e Covino 2003):

- A elevada percentagem de Magnésio na liga permitirá um aumento da resistência mecânica, a possibilidade de obter peças com um excelente acabamento superficial (brilhante, depois de polidas) assim como permitirá uma melhor resposta a tratamentos superficiais como a anodização, onde o Manganês poderá do mesmo modo intervir positivamente. Será também esperada uma maior resistência à corrosão e uma melhor relação entre resistência e ductilidade;
- O Titânio presente na liga destina-se a promover uma ligeira afinação do grão, permitindo um aumento da dureza da liga assim como um aumento da resistência à tração;
- Existem outros elementos de liga, nomeadamente o Silício, Ferro, Cobre, Níquel, entre outros, que devido à sua baixa percentagem na composição da liga, apenas poderão ser considerados como elementos de liga residuais.

Após a análise dos elementos de liga presentes na composição da liga AlMg4Zn, e da sua possível influência, será importante destacar as propriedades mecânicas e físicas da mesma.

A Tabela 16 apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas da liga em estudo. Após uma pesquisa exaustiva, e pela dificuldade de obtenção de algumas propriedades físicas, as propriedades em falta foram preenchidas na Tabela 15 (destacadas a vermelho) com as da liga 513.0-F, cuja composição é a que mais se aproxima da liga AlMg4Zn.

Tabela 16: Propriedades mecânicas e físicas da liga AlMg4Zn (Cverna 2001; Péchiney 1964).

Propriedades	
Massa específica [g/cm ³]	2.65
Módulo de elasticidade [GPa]	71
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.330
Extensão após rotura (%)	3
Tensão limite elástico (0.2%) [Mpa]	82.7
Intervalo de solidificação [°C]	640 - 570
Coefficiente de dilatação linear entre 20 e 100 °C (α) [K ⁻¹]	24×10^{-6}
Percentagem de contração [%]	13
Resistividade a 20 °C [$\mu\Omega$ cm ² /cm]	5
Condutividade térmica [W/(m.K)]	129.704
Calor específico [J/kg°C]	963
Viscosidade a 700 °C [N.s/m ²]	0.00106
Calor latente de fusão [kJ/Kg]	389
Tensão superficial (700 a 740 °C) [N/m]	0.61

Em seguida, apresenta-se na Figura 30 o diagrama de equilíbrio das ligas de alumínio-magnésio com a respetiva localização da liga AlMg4Zn no diagrama.

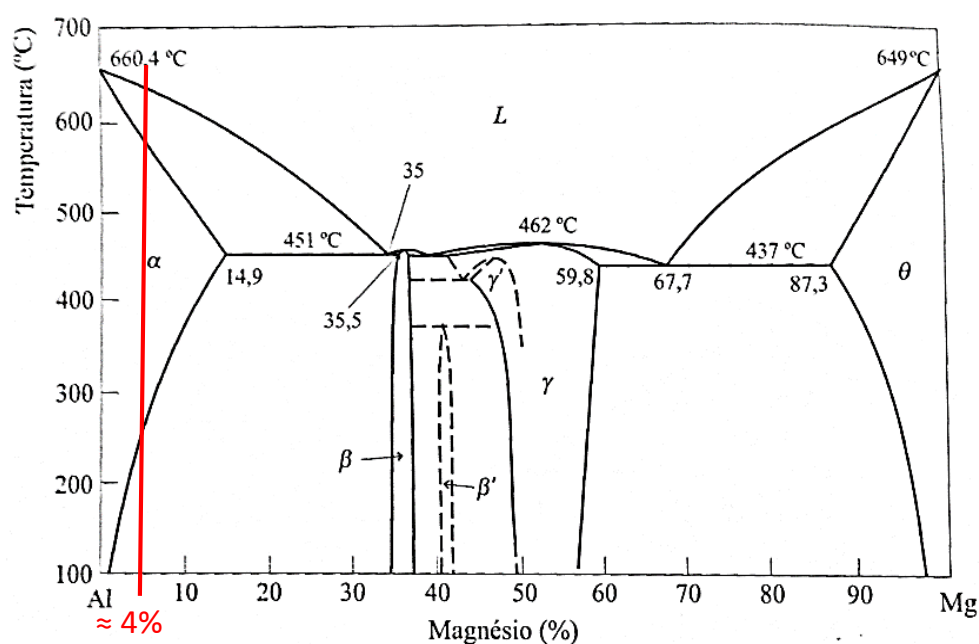


Figura 30: Localização da liga AlMg4Zn no diagrama de equilíbrio de uma liga Al-Mg (Silva, Duarte, e Antunes 2008).

2.5 Sistemas de gitagem e alimentação

De acordo com (Ferreira 1999), “o projeto dos sistemas de gitagem engloba o estudo de todas as medidas convergentes para a obtenção de peças sãs”. É importante fazer a distinção entre gitagem e alimentação:

- O sistema de gitagem é dado como o conjunto de canais externos à peça, através dos quais o metal líquido irá fluir para preencher a cavidade da moldação, onde a peça vazada solidificará;
- O sistema de alimentação está incluído no sistema de gitagem, já que o metal flui através deste, mas tem um papel fulcral e muito bem definido, que deverá ser distinguido do papel dos demais gitos. Essencialmente, o sistema de alimentação tem a função de compensar a contração do metal da peça aquando da solidificação, promovendo a obtenção de peças sãs. Para isso, utilizam-se gitos de alimentação ou, utilizando uma expressão mais comum, alimentadores.

Para uma melhor percepção da função dos alimentadores das peças fundidas, é importante perceber o modo como o metal arrefece na cavidade da moldação. O arrefecimento do metal fundido inicia-se na superfície de contacto com a parede interna da moldação, progredindo sucessivamente para o interior da peça, à medida que o metal da periferia arrefece e solidifica, por libertação de calor através do molde. A forma geométrica da peça fica definida assim que solidifica a primeira camada exterior de metal, sendo que o metal líquido interior vai compensando sucessivamente a contração correspondente à solidificação das várias camadas. No final da solidificação existe uma contração do metal não compensada em estado líquido (rechupe) que provoca um ou vários vazios, nas zonas que arrefecem em último lugar (pontos quentes). Por este motivo, os alimentadores são ligados às peças e colocados na vizinhança de zonas onde existe a tendência ao aparecimento de rechupes, com o objetivo de minimizar a ocorrência deste tipo de defeitos (Ferreira 1999).

Em geral as ligas de alumínio apresentam uma contração de aproximadamente 6% (Duarte 2004). No caso da liga de alumínio AlMg4Zn em estudo, a contração é cerca de 13%. Num volume de 300 cm³ de alumínio líquido, após solidificação haverá uma contração de 39 cm³ de volume, ficando a peça solidificada com apenas 261 cm³. Deste modo, torna-se clara a importância da utilização de alimentadores.

No projeto de um sistema de gitagem é necessário estabelecer um compromisso entre o número de peças perdidas (com defeitos não admissíveis) e o volume dos gitos e alimentadores calculados no projeto. A gitagem mais económica não é a que conduz a um menor número de peças perdidas. Regra geral, é conseguido à custa do aumento do volume dos gitos e alimentadores, traduzindo-se num rendimento global inferior. Um adequado projeto do sistema de gitagem permite minimizar os custos associados às operações posteriores de corte de gitos e acabamento das peças, assim como possibilita a obtenção de rendimentos superiores.

O rendimento do processo (também denominado de “aproveitamento global”) é dado pelo quociente entre o peso de todas as peças limpas, e sãs, da série, pelo peso do metal vazado.

$$\text{Rendimento (\%)} = 100 \times \frac{\text{Peso de todas as peças limpas e sãs}}{\text{Peso total do metal vazado}}$$

Quanto menor for a diferença entre o peso total do metal vazado (incluindo gitos e alimentadores) e o peso total das peças limpas e sãs, maior será o rendimento do processo. Para isso, é importante um correto dimensionamento dos sistemas de gitagem e alimentação, evitando um sobredimensionamento dos mesmos, já que para esse caso, haverá uma diminuição do rendimento. Em segunda análise, a utilização de sistemas de gitagem e alimentação sobredimensionados poderá provocar diferenças significativas entre o tempo de solidificação destes, e o tempo de solidificação das peças a obter, provocando um aumento do tempo de ciclo do processo.

Devido à importante função dos alimentadores, a condição necessária para que seja garantida uma boa alimentação é que estes tenham um tempo de solidificação superior ao da peça. Uma má alimentação poderá provocar um conjunto de defeitos, nomeadamente (Ferreira 1999):

- Rechupes;
- Deformações nas superfícies, provocadas pelo rechupe;
- Porosidade dispersa;
- Fendas quentes, etc.

Segundo (Ferreira 1999), o tempo de solidificação de uma peça metálica vazada numa moldação metálica pode ser dada pela *regra de Chvorinov*:

$$t = Kc \left(\frac{V}{S} \right)^2 \quad (1)$$

Em que,

$$Kc = \left\{ \frac{\rho' \times \sqrt{\pi \times \alpha_{mold}} \times [C'e(Tv - Tl) + Cl]}{2 K_{mold} (Tim - T0)} \right\}^2$$

Kc – Constante característica da liga, do sobreaquecimento e do material da moldação

V – Volume da peça

S – Superfície da peça em contacto com a superfície de extração de calor

ρ' – Massa específica do metal

α_{mold} – Difusividade térmica da moldação

$C'e$ – Calor específico médio do metal vazado

Tv – Temperatura de vazamento

Tl – Temperatura de início de solidificação do metal

Cl – Calor latente de fusão do metal

K_{mold} – Condutibilidade térmica da moldação

Tim – Temperatura da interface metal/moldação

$T0$ – Temperatura inicial da moldação

Por aplicação desta regra à peça e depois ao alimentador a ela ligado, pode determinar-se qual deles solidifica primeiro, permitindo ajuizar se o alimentador contém metal líquido até ao final da solidificação da peça, proporcionando uma alimentação eficaz (Ferreira 1999).

Resumindo, para que o alimentador possa desempenhar a sua função, o tempo de solidificação do alimentador t_{al} , terá de ser superior ao tempo de solidificação da peça t_p :

$$t_{al} > t_p \quad (2)$$

2.5.1 Dimensionamento dos sistemas de alimentação e gitagem

A forma ideal para um alimentador será a forma esférica para garantir um maior tempo de solidificação, pois de acordo com a regra anteriormente explicitada, o módulo de arrefecimento do alimentador $M = V/S$, tem o seu maior valor no caso de uma esfera a qual apresenta a menor superfície para o volume envolvido. No caso de moldações permanentes com plano de apartação vertical, não é difícil obter este tipo de geometria, embora para o caso de moldações em areia a obtenção deste tipo de formas se torna relativamente difícil, recorrendo-se na maioria dos casos a outras geometrias (Ferreira 1999).

Por este motivo, na realização do projeto dos sistemas de gitagem e alimentação, na parte experimental desta dissertação, todos os alimentadores serão de forma esférica.

De acordo com (Ferreira 1999; ASM International 1998), o cálculo da dimensão dos alimentadores poderá ser feito através do método dos módulos, método baseado na *regra de Chvorinov*. Wlodawer desenvolveu a aplicação prática deste conceito ao simplificar a equação de *Chvorinov* relativizando a variável tempo, pois o interesse deste método reside essencialmente na comparação entre os tempos de solidificação da peça e do alimentador, logo:

$$t \sim V/A \quad (3)$$

V – Volume

A – Área de transferência de calor

t – Tempo de solidificação

O tempo de solidificação é proporcional ao respetivo módulo de arrefecimento. Deste modo, quanto maior o módulo de arrefecimento, maior será o tempo de solidificação. Deverá então ser garantido que o módulo de arrefecimento do alimentador deverá ser superior ao da peça, para que os tempos de solidificação sigam o mesmo princípio.

Resumindo, e através de (2), (3):

$$\left(\frac{V}{A}\right)_{alimentador} > \left(\frac{V}{A}\right)_{peça} \Leftrightarrow t_{solid'alimentador} > t_{solid'peça}$$

Segundo (Ferreira 1999), para a aplicação do método dos módulos é escolhido um fator de segurança k , para o cálculo do módulo de arrefecimento do alimentador. Deste modo:

$$Mal = k \times Mp \quad (4)$$

O valor do coeficiente de segurança k é essencialmente função do metal vazado, e o seu valor poderá variar de autor para autor. A Tabela 17 apresenta valores do coeficiente de segurança para diferentes metais.

Tabela 17: Valores de coeficientes de segurança k (Ferreira 1999).

Metal	Coeficiente de segurança – k
Ferro fundido de alta resistência	1,0 – 1,2
Ferro fundido perlítico normal	0,8 – 1,0
Ferro fundido maleável	1,4
Ferro fundido esferoidal	1,4
Aço	1,2
Níquel, cupro-níquel, cupro-alumínio	1,4
Cobre, bronzes, latão 70/30 e 60/40	1,2
Latão de alta resistência	1,4
Ligas leves	1,4

Foi anteriormente descrito o importante papel dos alimentadores na fundição. Além da alimentação propriamente dita, é necessário projetar os canais de gitagem de modo a promover a obtenção de fundidos com as características desejadas. O projeto de um sistema de gitagem comporta diferentes especificações. Regra geral, as especificações mais importantes são (Ferreira 1999; ASM International 1998):

- Promover uma solidificação direcional: devido às diferentes massividades das zonas da peça, algumas irão solidificar primeiro do que outras. Num sistema de gitagem bem arquitetado, a solidificação dar-se-á desde as extremidades das peças, em direção à entrada do canal principal ou dos alimentadores, caso estes existam. Desde modo, é promovida a concentração de defeitos nos alimentadores e não nas peças. É importante o controlo das secções de maneira a que se mantenha o efeito do fluxo de alimentação proveniente do alimentador;
- Enchimento rápido da moldação: especialmente para peças com paredes finas, caso o enchimento seja demasiado lento, a perda de calor do metal líquido pode resultar num arrefecimento prematuro, originando defeitos superficiais (por exemplo, fissuração a frio) ou o enchimento incompleto de certas secções. Deste modo, para peças com paredes finas, a velocidade de enchimento deverá ser suficientemente elevada para a espessura em questão;
- Minimizar a turbulência e a erosão da moldação e dos machos: a turbulência pode promover o arrastamento de gases no fluxo de metal, levando ao aparecimento de

defeitos. Do mesmo modo, um escoamento turbulento poderá provocar um aumento do desgaste dos machos e da cavidade da moldação, podendo o material erodido migrar para as peças, dando origem a inclusões nos fundidos;

- Remover a escória, impurezas e inclusões: diversas impurezas poderão migrar para as peças quer por origem externa (escória do forno, material refratário da colher de transporte, entre outros), quer por origem interna ao sistema. Poderão, por exemplo, ser introduzidos no sistema de gitagem filtros cerâmicos que permitem reter grande parte dessas partículas. Será dada maior ênfase à utilização de filtros na secção 2.5.2;
- Melhorar custos de produção: uma variedade de custos irrecuperáveis é atribuída ao metal que preenche o sistema de gitagem e alimentação. Estes componentes são geralmente refundidos, onde o seu valor vai decrescendo até ao de sucata. Deverão, deste modo, ser evitados sistemas de gitagem e alimentação sobredimensionados. O aumento da percentagem de peças sãs permite aumentar a capacidade de produção de uma fundição, e a minimização dos custos associados à produção, transporte e refundição (quando possível) de peças defeituosas;
- Controlar as condições de escoamento: durante a fase de enchimento, deve ser atingida o mais rapidamente possível uma velocidade constante de escoamento no sistema de gitagem. As condições do escoamento devem ser mantidas a cada vazamento. A crescente utilização de sistemas automatizados tem desempenhado um importante papel neste campo.

Das especificações listadas, é bastante difícil (ou mesmo impossível) satisfazer todas estas, devendo por isso ser escolhida uma solução em compromisso entre as diferentes especificações de conceção, que permita obter resultados mais satisfatórios. A título de exemplo, será difícil o preenchimento de espessuras finas, que exigem velocidades de enchimento elevadas, através de escoamentos pouco turbulentos.

2.5.2 Filtros cerâmicos

Poder-se-ão incluir no sistema de gitagem determinados filtros que permitem minimizar as inclusões de óxidos e outras impurezas, melhorando significativamente a qualidade final dos fundidos. Devido à importância da sua utilização, é feito em seguida um destaque à utilização de filtros cerâmicos, amplamente utilizados na FCBP.

Segundo (Ferreira 1999), os filtros cerâmicos são atualmente os mais utilizados na indústria de fundição para melhorar a pureza dos fundidos e reduzir o seu custo de produção, assim como diminuir a taxa de rejeição das mesmas. A maioria das ligas de fundição está sujeita à presença de partículas que podem afetar prejudicialmente o aspeto e as propriedades físicas das peças obtidas. A utilização de filtros cerâmicos nos sistemas de gitagem promove a remoção das escórias e outras impurezas, tais como partículas não metálicas, antes da entrada do metal na cavidade da moldação.

Nestas partículas incluem-se normalmente:

- Óxidos gerados durante a fusão, transferência e vazamento;
- Partículas refratárias do forno de fusão e do sistema de gitagem, ou partículas arrastadas dos machos durante o enchimento (essencialmente de machos em areia);
- Produtos de reação provenientes das operações metalúrgicas;
- Partículas metálicas e não metálicas não dissolvidas, consequência das adições ao metal em fusão para alterações metalúrgicas.

As partículas ou inclusões inserem-se como descontinuidades na matriz da peça fundida, e podem estar na origem de efeitos adversos, tais como:

- Redução das propriedades mecânicas como a resistência à tração e a extensão após rotura;
- Redução da resistência à fadiga;
- Impossibilidade de realizar tratamentos superficiais posteriores, tais como, a anodização.
- Fraco acabamento superficial dos fundidos;

Existem diversos tipos de filtros cerâmicos, em diferentes materiais e formas. As mais comuns vão desde espuma reticulada, formas celulares extrudadas, formas prensadas e blocos perfurados. A Figura 31 apresenta um filtro cerâmico do tipo espuma. Este tipo de filtro é considerado muito eficaz na remoção de inclusões. A filtragem ocorre segundo dois mecanismos distintos: separação física (processo de peneira) e atração química.

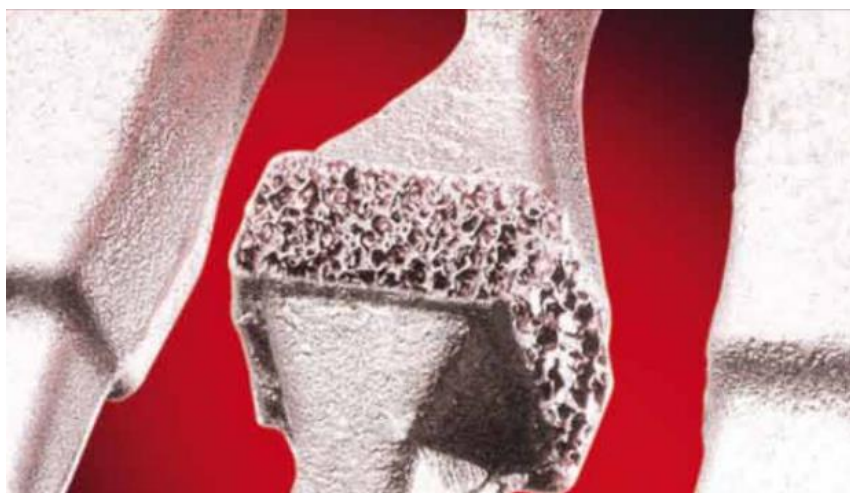


Figura 31: Filtro de espuma SIVEX-FC da FOSECO (Foseco 2013).

O dimensionamento do sistema de gitagem deve conduzir à menor turbulência possível, tanto à saída do filtro como na cavidade da moldação. Devido a uma menor necessidade de canais de distribuição de grandes dimensões (em comprimento e em secção), aumenta-se assim o rendimento do processo. Por todos os motivos anteriormente enumerados, o projeto do sistema de gitagem deverá, sempre que necessário, ter em conta a utilização de filtros.

2.6 Simulação numérica

A simulação numérica é, atualmente, uma componente essencial no desenvolvimento de qualquer produto de fundição. A maioria dos fenómenos físicos e químicos respeita diversas leis de conservação: através da resolução computacional de sistemas de equações diferenciais extremamente complexos, que aproximam o fenómeno em estudo e se baseiam nas leis de conservação, geram-se soluções praticamente impossíveis de serem obtidas através de uma resolução analítica do sistema (Melo 2014; Devloo 2005).

De acordo com (Melo 2014), a teoria de base da simulação numérica consiste na divisão de um problema em sub-problemas mais simples, remontando a 1943 quando R. Courant propôs a utilização de um modelo discretizador. A discretização consiste na sub-divisão de um modelo num maior número de elementos em análise, permitindo aproximar a geometria do modelo a uma composta por n pequenos elementos individuais, os elementos finitos. Estes elementos estão ligados entre si por nós, formando uma malha de elementos finitos. Este processo de discretização da geometria da peça tem o nome de processo de geração de malha.

Embora a teoria de base da simulação numérica remonte a 1943, o termo “Elementos Finitos” só foi utilizado em 1960 por Clough. A evolução da simulação numérica nas últimas décadas deve-se principalmente à evolução da capacidade de processamento dos processadores, que duplica a cada dois anos segundo a lei de Moore. Esta lei foi definida por volta de 1970, quando o número de transístores de um processador (diretamente relacionados com a capacidade de processamento deste) era aproximadamente 2000, valor incomparavelmente menor aos dos processadores atuais, que ronda os 2,6 biliões (2 600 000 000). Deste modo, é expectável que os *softwares* de simulação numérica se tornem ferramentas cada vez mais poderosas, permitindo a resolução de problemas cada vez mais complexos, em janelas temporais mais curtas (Melo 2014).

Os *softwares* de simulação numérica partem de modelos em CAD3D, que poderão ser realizados no próprio software ou noutro especialmente dedicado para este efeito. É inicialmente definido o material do modelo (e as correspondentes propriedades do mesmo), é gerada a malha de elementos finitos e são definidas as condições de fronteira do problema. Depois deste conjunto de especificações, que permitirão reproduzir as condições do problema real, o *software* calcula a solução do problema através da resolução do sistema de equações diferenciais que definem o comportamento da peça. Os resultados são, por norma, apresentados de forma gráfica (com utilização de gradientes de cor sobrepostos no modelo), para que a sua leitura e interpretação seja realizada com relativa facilidade. A precisão da solução apresentada é função do número de elementos utilizados: quanto maior o número de elementos finitos, mais elevado é o poder de processamento exigido ao processador e maior o tempo necessário para gerar resultados. É necessário ter em conta este *trade-off*: precisão do cálculo *versus* custo da simulação (Melo 2014; "Finite element method" 2014).

Devido à sua inquestionável importância e com um domínio de aplicação extremamente vasto, as diversas ferramentas de simulação numérica constituem uma componente essencial no *portfolio* de um engenheiro.

2.6.1 Método das Diferenças Finitas (MDF) e Método de Elementos Finitos (MEF)

A maioria dos *softwares* de simulação numérica tem por base dois métodos: o Método de Elementos Finitos (MEF) e o Método das Diferenças Finitas (MDF). Ambos os métodos são utilizados com o mesmo objetivo: a resolução de equações diferenciais parciais ("FEM and FDM" 2014).

Segundo (Melo 2014; "Finite element method" 2014), o MDF baseia-se na aproximação do resultado de equações diferenciais através da resolução de equações e algoritmos das diferenças finitas, fazendo sucessivas aproximações às derivadas destas. É um método altamente teórico e que apresenta algumas desvantagens quando comparado com o MEF, que serão apresentadas posteriormente. O MDF é mais adequado à resolução de problemas que exigem uma discretização num grande número de células (modelos de grande dimensão), e portanto, o custo da solução favorece o método mais simples (embora menos preciso). Por este motivo, o MDF aplica-se a problemas de CFD (*Computational Fluid Dynamics* – problemas relativos à mecânica dos fluídos) envolvendo fluxos exteriores (escoamentos de ar em torno de um carro por exemplo).

No MDF apenas é possível utilizar elementos básicos como cubos ou paralelepípedos, contrariamente ao MEF onde é possível utilizar elementos com geometrias mais complexas. Esta restrição no MDF leva a que na geração da malha, a aproximação da superfície não seja realizada da melhor forma, traduzindo-se em resultados com um maior desvio face à situação real. Esta limitação na adaptação das geometrias encontra-se representada na Figura 32.

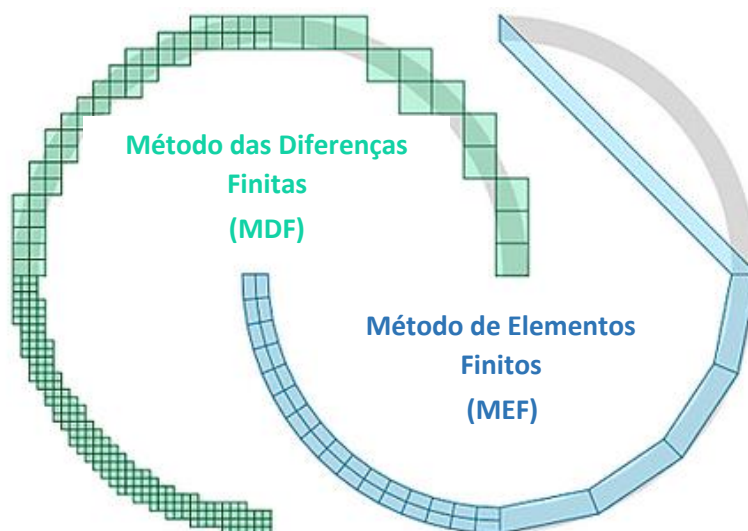


Figura 32: Aproximação da geometria de um cilindro oco de parede fina segundo os métodos MEF e MDF ("FEM and FDM" 2014).

O MEF, baseando-se no MDF, minimiza a variação do erro das equações diferenciais e constitui o método mais utilizado em engenharia, pois permite uma análise mais detalhada e precisa dos problemas, especialmente naqueles em que as geometrias são mais complexas (Melo 2014).

Em suma, destacam-se em seguida algumas vantagens e desvantagens do MEF sobre o MDF ("FEM and FDM" 2014; Melo 2014):

- Através do MEF é mais fácil resolver problemas envolvendo geometrias complexas;
- O MEF possibilita a obtenção de resultados mais detalhados e mais precisos;
- Através do MEF é possível realizar refinamentos (maior numero de elementos, obrigatoriamente de menor dimensão) em zonas específicas da malha, contrariamente ao MDF;
- Embora menos versátil, o MDF é mais fácil de implementar.

2.6.2 O uso da simulação numérica nos processos de fundição

A possibilidade de realizar simulações numéricas de enchimento e solidificação de peças é uma ferramenta poderosíssima no panorama atual da indústria de fundição, e por esse motivo, estas ferramentas tornam-se cada vez mais parte integrante dos projetos de fundição. Devido à elevada competitividade presente nesta indústria, a utilização de *softwares* de simulação poderá fazer a diferença na sustentabilidade de uma empresa a longo prazo.

A possibilidade de simular diferentes parâmetros de projeto, desde o ensaio de diversas geometrias das peças, dimensão e geometria de diversos sistemas de gitagem e alimentação e a simulação de diversas condições de operabilidade do processo de fundição (velocidade de enchimento, pressão, temperatura de vazamento, temperatura do molde, etc...), promove a otimização do processo em causa e leva respetivamente à produção de peças com melhor qualidade, em janelas temporais cada vez mais curtas. De acordo com (Ravi 2010), a utilização de ferramentas de simulação CAD permite reduzir em aproximadamente 30% o tempo necessário à obtenção da primeira “peça boa”: de 10 semanas para 7 semanas, e permite diminuir a taxa de rejeição média de peças de 8,6% para 4,1%. O autor refere ainda que a utilização destes *softwares* promove um aumento da satisfação por parte dos clientes.

Comparativamente com os métodos de projeto tradicionais, a utilização de *softwares* de simulação permite detetar erros de projeto ainda em fases iniciais do mesmo, onde o impacto económico é notoriamente mais reduzido.

Resumidamente, a utilização de ferramentas de simulação numérica permite uma série de benefícios a curto e a longo prazo (Melo 2014; Ravi 2010):

- Obtenção de peças com melhor qualidade e com menores taxas de rejeição;
- Aumento do rendimento global do processo através da redução do volume dos gitos e alimentadores;

- Possibilidade de afinação mais rápida dos parâmetros do processo (velocidade de enchimento, pressão, temperatura do molde, temperatura de vazamento da liga, entre outros), evitando metodologias de “tentativa erro” que implicam custos acrescidos;
- Diminuição do tempo de projeto das moldações: com recurso à simulação, o tempo necessário para o ajuste destas ferramentas é mais reduzido, traduzindo-se em menores custos totais dos projetos;
- Possibilidade de deteção de erros ainda na fase de projeto onde o impacto económico é mais reduzido;
- Aumento da satisfação por parte dos clientes.

No modelo da simulação, quanto melhor representado estiver o processo real e todas variáveis inerentes a este, mais próximos da realidade estarão os resultados da simulação. De qualquer modo, ainda que todos os parâmetros sejam especificados com um elevado detalhe no *software*, é bastante difícil reproduzir exatamente as condições verificadas no processo real, até porque, estas poderão apresentar variações temporais e espaciais de difícil quantificação (Monteiro 1996). Existem diversos fatores que poderão influenciar este possível desvio, de onde é possível destacar (Monteiro 1996):

- Campo de temperaturas não uniforme na coquilha no instante inicial;
- Dificuldade na definição precisa do coeficiente de transferência de calor: quer por diferenças finitas na temperatura de vazamento da liga ou na temperatura do molde, quer por alterações na resistência térmica da interface do molde, que varia por exemplo com a espessura do revestimento ou do desmoldante que é aplicado na coquilha (o próprio desgaste da coquilha poderá influenciar o coeficiente de transferência de calor).

Segundo (Ravi 2010), nos resultados das simulações numéricas, e relativamente à localização de defeitos relacionados com a solidificação do metal (essencialmente micro e macro rechupes), é possível obter resultados muito próximos dos registados no processo real. O mesmo não se verifica nas simulações de enchimento, onde os resultados apresentam, regra geral, desvios consideráveis. Por este motivo, o autor refere que é aconselhável começar pela simulação do processo de solidificação, que requer consideravelmente menos *inputs* e que tem um elevado impacto na qualidade final dos fundidos (os rechupes representam, em média, 50% dos defeitos dos fundidos). A simulação do processo de solidificação deverá ser realizada de modo a permitir a otimização dos sistemas de gitagem e alimentação, que têm um elevado impacto no rendimento global. As simulações de enchimento deverão portanto ser realizadas em último lugar.

Pelos motivos referidos no parágrafo anterior, a sequência das simulações numéricas realizadas ao longo desta dissertação, seguiu a metodologia apresentada.

2.6.3 *Softwares de simulação numérica*

Existe no mercado uma diversidade muito grande de programas de simulação, que são utilizados nas mais diversas áreas da engenharia. É possível englobar estes programas em dois grupos: os “programas genéricos” e os “programas específicos”. Do primeiro grupo fazem parte aqueles que abordam de maneira generalista os problemas genéricos de diferentes áreas da engenharia. Estes programas são geralmente mais versáteis. No segundo grupo englobam-se os programas que são dedicados à resolução de problemas em áreas muito específicas de estudo (Melo 2014).

A título de exemplo são listados alguns dos *softwares* dos dois grupos anteriormente mencionados (a grande quantidade de programas existentes impossibilita uma análise exhaustiva de cada *software*).

Softwares genéricos (Melo 2014):

- ABAQUS
Software de análise por MEF, extensamente utilizado nos mais variados ramos da engenharia e setores industriais. O ABAQUS permite simular problemas das mais diversas áreas, mas é sobretudo conhecido pelas suas potencialidades em problemas de simulação estrutural. A sua versatilidade, a possibilidade de utilizar uma vasta gama de materiais e o elevado grau de customização que é possível neste *software*, fazem dele uma das escolhas preferenciais no meio académico;
- ANSYS
Programa extremamente utilizado na indústria automóvel, principalmente na realização de simulações de *crash tests* e na otimização aerodinâmica. Tem também uma forte utilização nas indústrias aeroespacial, energética e eletrónica;
- SolidWorks
Permite a análise de escoamentos de fluídos, a otimização estrutural de conjuntos mecânicos, análise térmica de circuitos elétricos, entre outras funcionalidades. Devido à sua simplicidade de utilização e facilidade na modelação 3D, é também um *software* muito utilizado no meio académico. Este *software* será utilizado ao longo de toda a dissertação: na modelação 3D de todas as peças e conjuntos mecânicos gerados assim como na simulação estrutural da estrutura idealizada na parte prática da dissertação.

Softwares específicos (Melo 2014):

- AutoForm e DEFORM
Softwares muito utilizado na simulação da conformação plástica de metais, extensamente utilizados na indústria automóvel;
- ProCAST
Programa baseado no MDF, desenvolvido ao longo dos últimos vinte anos pelo grupo francês, ESI, em colaboração com diversos parceiros industriais e instituições académicas de todo o mundo. Este *software* permite simular uma grande variedade de processos de fundição: FCR, FI, FCBP, FCR, *Investment casting*, entre outros. O ProCAST é uma ferramenta bastante completa, que possibilita a previsão de defeitos relacionados com os fenómenos de solidificação e de enchimento das peças. É também possível a previsão das especificações finais de carácter metalúrgico e geométrico das peças: tamanho de grão, propriedades mecânicas, distorções, tolerâncias dimensionais, entre outros. Pelas fortes potencialidades deste programa, anteriormente referidas, o ProCAST é utilizado no INEGI como ferramenta de apoio à fundição, e será utilizado na parte prática desta dissertação para simulação de diferentes modelos de alimentação e gítagem.
- MoldFlow
Software da Autodesk muito utilizado na simulação da injeção de plásticos.

3. Trabalho Experimental

3.1 Introdução

A parte experimental relativa a esta dissertação consiste na utilização da tecnologia de fundição por baixa pressão para a produção de puxadores de portas numa liga de alumínio. O trabalho realizado pode, grosso modo, ser subdividido em duas partes relacionadas intrinsecamente entre si:

- 1) Projeto de uma coquilha para vazamento de uma liga de alumínio (AlMg4Zn), para a obtenção de puxadores de portas através da FCBP;
- 2) Projeto de uma estrutura de adaptação de uma coquilhadora a um forno pré-existente no INEGI para desenvolvimento do processo de FCBP.

Relativamente à primeira parte, o objetivo é a realização do projeto de uma coquilha para utilização na FCBP, para obtenção de um puxador em liga de alumínio (AlMg4Zn). A coquilha deverá ser projetada de modo a ser integrada na coquilhadora pré-existente e permitir a produção peças isentas de defeitos (ou com o menor número possível dos mesmos), com uma elevada precisão dimensional, bom acabamento superficial e com um elevado rendimento metalúrgico. Esta fase do projeto é constituída essencialmente por duas subfases:

- Geração e escolha de conceitos: *layout* da cavidade da coquilha;
- Projeto dos sistema de gitagem e alimentação.

Após uma breve análise e discussão de diferentes opções de distribuição das peças na coquilha, quer pela quantidade de peças a realizar em cada vazamento, quer na própria orientação das mesmas, escolheu-se um *layout* preferencial para a cavidade, que permitirá obter (em teoria) peças sãs. Posteriormente à definição do *layout*, realizou-se o projeto da gitagem e alimentação. Para suportar e auxiliar importantes decisões ao longo do projeto, recorreu-se ao uso do *software* de simulação numérica ProCAST.

A segunda parte do trabalho experimental consiste no projeto de uma estrutura que permita a adaptação da coquilhadora pré-existente na STA, a um forno de manutenção pré-existente no INEGI. Para isso, será necessário criar uma estrutura de suporte da coquilhadora, que permita a sua fixação e movimentação relativamente ao forno. Esta estrutura deverá garantir o correto funcionamento da coquilhadora, assim como um fácil acesso à máquina para a remoção dos fundidos. É ainda importante garantir que o enchimento do forno possa ser realizado com relativa facilidade e rapidez, minimizando o *idle time* (tempo de paragem) associado a esta operação. A penosidade associada ao trabalho do operador deverá do mesmo modo ser tida em conta.

A utilização do SolidWorks desempenha um importante papel na materialização visual dos conceitos gerados, no encontro de novas soluções, na identificação de alguns problemas e realização de simulações estruturais da estrutura de adaptação, permitindo simular o comportamento real da estrutura sob carga.

3.2 Projeto de uma coquilha para vazamento de uma liga de alumínio (AlMg4Zn), para obter puxadores de portas através da FCBP

A fase inicial do projeto da coquilha consiste na geração e escolha de conceitos. Realizaram-se diversas combinações das várias orientações e número de peças que é possível realizar a cada vazamento, sendo feita a escolha de um dos conceitos gerados. Após a escolha do conceito a adotar, será realizado o projeto dos sistemas gitagem e alimentação correspondentes.

Existem diversos parâmetros de elevada importância que deverão ser considerados neste projeto, nomeadamente:

- 1) Atravancamentos relativos à coquilhadora e sistema de movimentação dos machos;
- 2) Sistemas de gitagem e alimentação;
- 3) Rendimento do processo;
- 4) Número peças fundidas obtidas em cada vazamento;
- 5) Diâmetro do gito de enchimento e material do tubo de enchimento.

Em seguida, serão explorados os tópicos anteriormente enumerados:

1) Atravancamentos da coquilhadora e sistema de movimentação dos machos:

- De acordo com os atravancamentos existentes, essencialmente devido às guias da coquilhadora, foi possível estabelecer as dimensões máximas para a coquilha (a coquilha terá de 'caber' no espaço interior às guias da coquilhadora). A dimensão máxima da coquilha condiciona o *layout* da cavidade e dos sistemas de gitagem e alimentação. Na Figura 33 é apresentada uma imagem virtual de um dos pratos da coquilhadora, com as dimensões do prato real, onde estão representadas as cotas existentes entre guias.

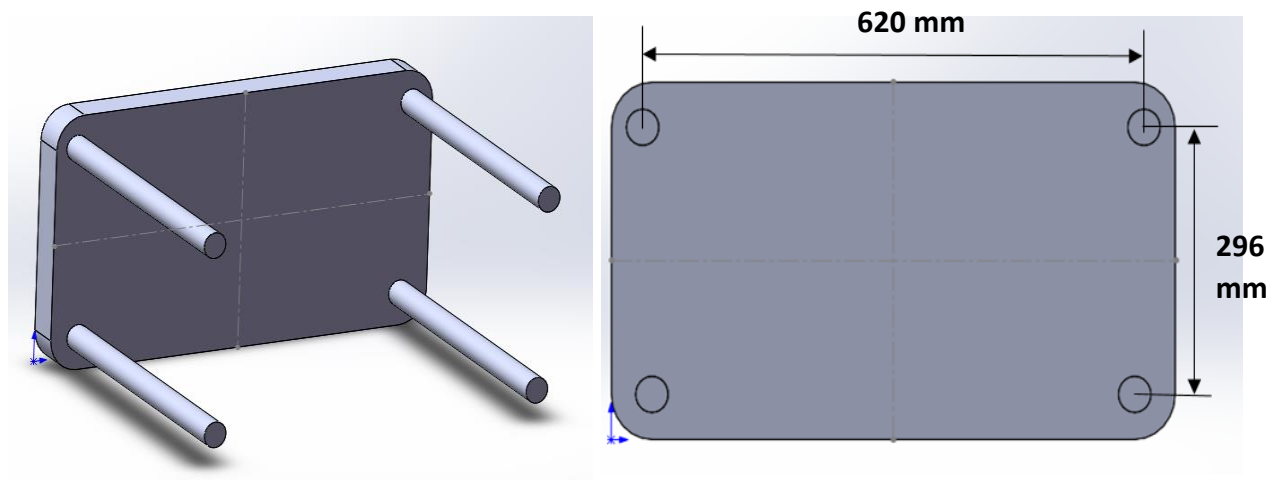


Figura 33: Imagem virtual do prato da coquilhadora para consideração dos atravancamentos existentes (à esquerda) e cotas existentes entre guias (à direita).

Por outro lado, é também necessário considerar a necessidade de utilização de um sistema de movimentação de machos. A STA, devido a produzir o mesmo tipo de puxador, quer por FCG quer por FCR, possui nas suas instalações sistemas de movimentação de machos que poderão ser utilizados para movimentação dos machos na FCBP, desde que a sua adaptação seja fácil.

O sistema pré-existente na empresa permite o avanço e recuo simultâneo de dois machos, com uma cota de 48 mm entre os dois eixos. Esta distância poderá ser regulável, sendo possível um ligeiro ajuste até um valor máximo de 53 mm. Caso a utilização do sistema de movimentação de machos pré-existente não seja possível, poderá ser adquirido um novo sistema, sujeito a aprovação por parte da STA.

A representação da modelação 3D do sistema de movimentação de machos pré-existente, assim como um excerto do desenho 2D de uma coquilha que faz uso do mesmo sistema (em FCR), são apresentados na Figura 34.

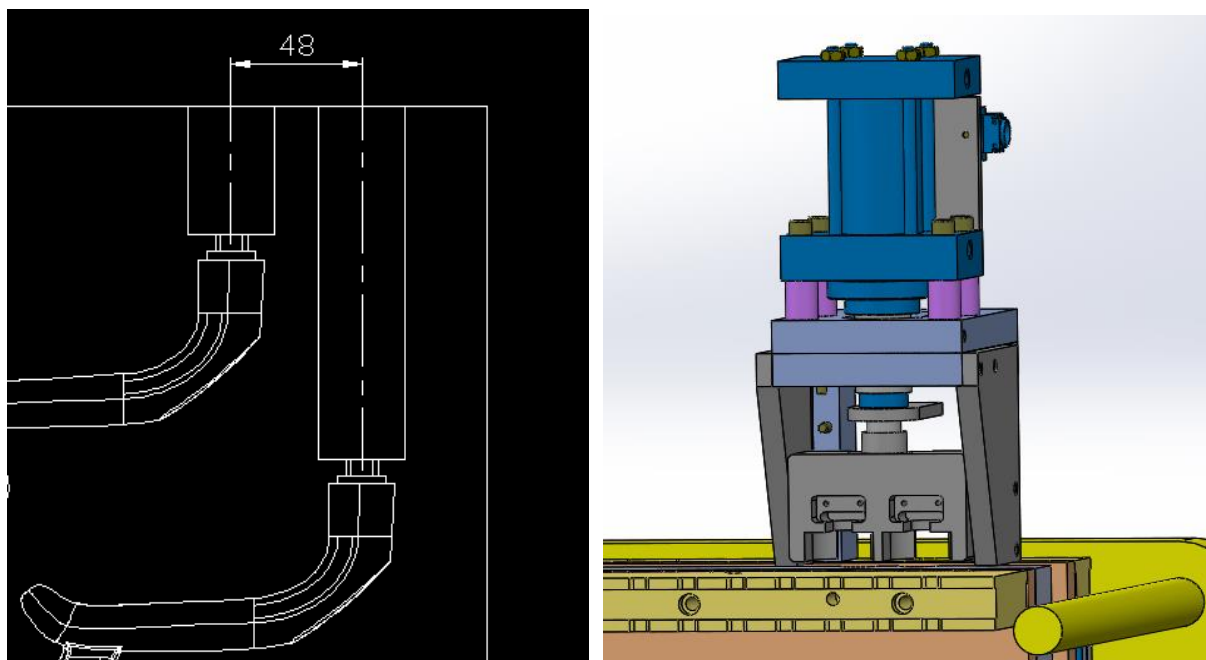


Figura 34: Excerto do desenho 2D de uma coquilha pré-existente na STA para FCR: distância entre os dois machos que fazem parte do mesmo sistema hidráulico de movimentação dos mesmos (à esquerda); Modelação 3D do sistema de movimentação de machos (à direita).

2) Sistemas de gitagem e alimentação para a obtenção de peças sem defeitos:

- É natural que o projeto da coquilha tenha uma forte influência nos possíveis defeitos das peças fundidas, principalmente quando o projeto dos sistemas de gitagem e alimentação não são projetados da melhor forma. Para a minimização de defeitos, a simulação numérica de diversos sistemas de gitagem e alimentação é uma grande mais-valia, na medida em que permite uma melhor perceção dos resultados esperados no processo real. É assim possível a escolha de uma solução preferencial, assim como realizar correções dentro de cada solução de modo a que os resultados sejam otimizados. Obviamente, a simulação numérica não é uma

representação 100% fiel da realidade, mas constitui nesta fase uma importante ferramenta de apoio à decisão.

3) Rendimento do processo:

- O projeto dos sistemas e gítagem e alimentação deve assegurar um elevado rendimento do processo. Para isso, a dimensão dos gitos e alimentadores deverá ser projetada de modo a ser evitada uma solução sobredimensionada.

4) Número de peças fundidas obtidas em cada vazamento:

- Quanto maior for o número de peças obtidas em cada vazamento, mais produtivo será o processo. Deste modo, a coquilha deverá ser desenhada de modo a permitir a obtenção do maior número de peças possível, sem prejuízo para a qualidade das mesmas. No caso em estudo, e de modo a permitir a utilização do sistema de movimentação de machos pré-existente, a dimensão máxima que a coquilha poderá ter possibilita a fundição em simultâneo de um máximo de 4 peças. Por uma questão de obtenção de um gradiente de tensões de origem térmica simétrico, as duas opções mais óbvias foram, portanto, o projeto de uma coquilha para fundição de 4 peças em simultâneo (mais produtivo), ou caso não seja possível, optar pela fundição de 2 peças (menos produtivo). Na secção correspondente à geração e escolha e conceitos, serão apresentadas diversas soluções relativas a este tópico.

5) Diâmetro do gito de enchimento e material do tubo de enchimento

- Para um maior aproveitamento global (rendimento), o diâmetro do gito de enchimento deverá ser o menor possível, desde que não ponha em causa a qualidade dos fundidos. Como a coquilha está a uma temperatura inferior à da liga a vazar, é sabido que quanto menor o diâmetro do gito de enchimento, mais rápido será o arrefecimento da liga, podendo comprometer a qualidade das peças. Caso o diâmetro do gito seja demasiado baixo, pode inclusive bloquear a passagem do metal.

Relativamente ao material do tubo de enchimento, caso seja em ferro fundido, existe a tendência para a geração e a acumulação de impurezas nas paredes do tubo, que poderão migrar para as peças, refletindo-se na qualidade final das mesmas, ou contaminar o banho, aquando do recuo do metal para o forno. Deste modo, embora possam ser utilizados revestimentos no tubo de enchimento que permitem minimizar esta consequência negativa, a utilização de tubos de enchimento cerâmicos é uma prática aconselhável. Por outro lado, quando são utilizados tubos de enchimento cerâmicos, não existe a necessidade de pré-aquecer o tubo em cada vazamento. No caso da utilização de ferros fundidos, normalmente realiza-se o pré-aquecimento do tubo através de sistemas do tipo maçarico. O objetivo do pré-aquecimento é não permitir que o metal arrefeça ao longo do tubo de enchimento, de modo a entrar na coquilha à temperatura desejada.

Na Figura 35 encontra-se representado o tubo de enchimento cerâmico, em sialon, que será utilizado neste projeto (à esquerda), assim como o tipo de pré-aquecimento que é geralmente utilizado para tubos de enchimento em ferro fundido (à direita).



Figura 35: Tubo de enchimento cerâmico que será utilizado neste projeto (à esquerda), e pré-aquecimento de um tubo de enchimento em ferro fundido através de maçaricos (à direita) (INDUGA 2013).

3.2.1 Geração e escolha de conceitos

Existem diversas configurações que poderão ser adotadas para o *layout* da cavidade da coquilha. Serão apresentadas as diversas configurações desenvolvidas, sendo feita uma análise dos prós e contras de cada solução gerada. A coquilha poderá ser projetada de modo a realizar uma, duas, três ou quatro peças a cada vazamento (idealmente duas ou quatro por uma questão de simetria de tensões), e para cada uma destas opções, a possível orientação das peças deverá ser analisada tendo em conta a integração do sistema de movimentação de machos pré-existente (que exige uma distância entre machos de 48 mm). Este sistema apenas poderá ser colocado no topo ou nas laterais da coquilha, uma vez que a coquilha assenta (a cada vazamento) no bico do forno, impossibilitando a colocação do sistema de machos na parte inferior da coquilha.

Iniciou-se esta análise na tentativa de ir ao encontro de uma solução que permita realizar o maior número de peças a cada vazamento. Deste modo, o projeto de uma coquilha para a fundição de quatro peças surge como opção preferencial.

Serão apresentados em seguida diferentes *layouts* para a fundição simultânea de duas ou quatro peças, apenas com cotagens de atravancamento. As dimensões utilizadas como referência neste projeto foram o diâmetro do gito de enchimento (20 mm, comum na FCBP), dimensão da coquilha, dimensão do sistema de movimentação dos machos e dos respectivos puxadores. É importante destacar que os sistemas de gitagem e alimentação não se encontram dimensionados nesta fase, sendo apenas utilizada uma possível simplificação dos mesmos para materialização dos diferentes conceitos.

Na Figura 36 é apresentada a geometria do puxador, onde se encontram referenciadas as duas regiões principais do mesmo: a quadra (onde se insere o macho) e o manípulo. A região da quadra contém uma superfície plana. Para uma análise mais detalhada da geometria do puxador, poderá ser consultado o Anexo E.

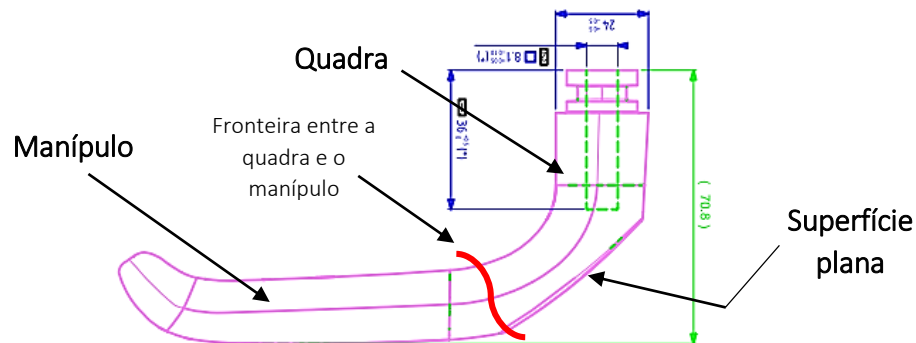


Figura 36: Desenho do puxador com a identificação das duas principais regiões: a quadra e o manípulo.

Layout 1

A primeira distribuição desenvolvida, denominada de *layout 1*, encontra-se representada na Figura 37.

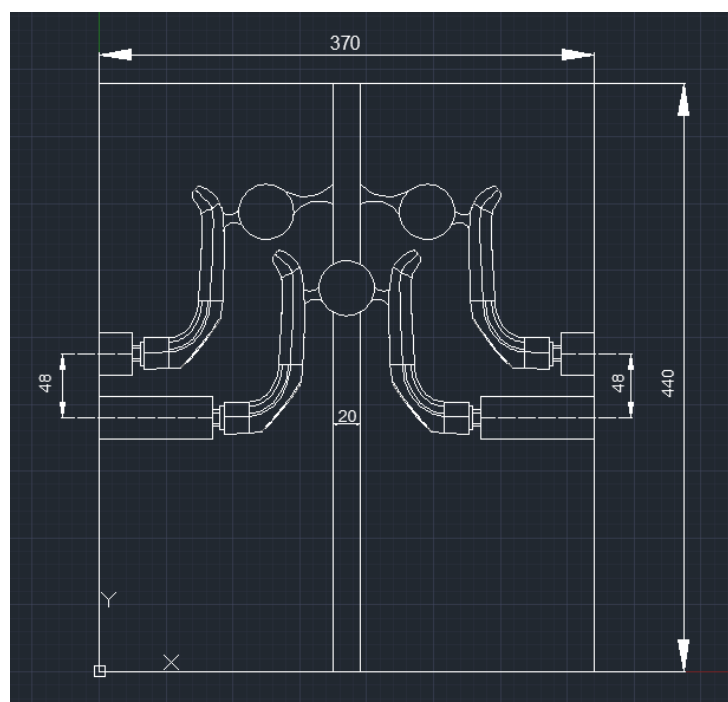


Figura 37: Desenho 2D do layout 1 realizado no software AutoCAD 2014.

Serão em seguida destacadas as vantagens e desvantagens da utilização do *layout 1*:

- Vantagens:
 - Fundição simultânea de quatro puxadores;
 - Possibilidade de utilização do sistema de movimentação de machos pré-existente;

- Gradiente de tensões de origem térmica simétrico.
- Desvantagens:
 - Possível queda de metal nas quatro peças (desde os ataques até às zonas onde estão inseridos os machos) (ver Figura 38);
 - O ataque nos quatro puxadores não poderá ser realizado na zona plana da quadra, contrariamente a outras soluções. Caso seja possível o ataque na zona plana dos puxadores, as operações posteriores de acabamento das peças tornam-se mais simples, contrariamente ao ataque na zona do manípulo (zona curva);

A possível queda de metal desde a zona dos ataques até à zona da quadra encontra-se representada na Figura 38. Esta possível queda de metal ('H') será alvo de estudo aquando das simulações numéricas de enchimento, realizadas após as simulações numéricas de solidificação. De qualquer modo, as características intrínsecas à FCBP permitem minimizar as consequências desta queda, através da redução da velocidade do metal na secção correspondente ao ataque às peças.

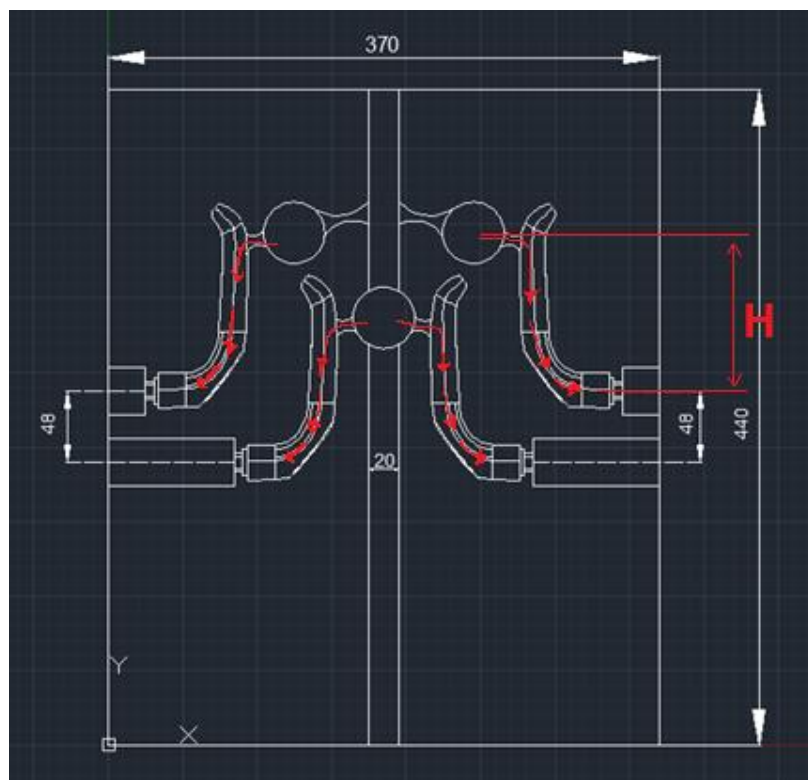


Figura 38: Possível queda de metal na utilização da solução do layout 1.

Na secção 3.2.3 será introduzido um novo conceito que deriva do conceito apresentado neste layout, mas que poderá permitir a minimização da possível queda de metal. Esta minimização poderá ser conseguida através da rotação em 180° da coquilha.

Layout 2

O *layout 2* foi desenvolvido na tentativa de ir ao encontro de uma orientação que permita o ataque às peças na zona plana dos puxadores. Neste caso, a realização de operações posteriores à fundição, nomeadamente a remoção dos gitos e alimentadores e a correção da geometria da peça, torna-se mais fácil (por maquinagem/rebarbagem e polimento manual). Este *layout* encontra-se apresentado na Figura 39.

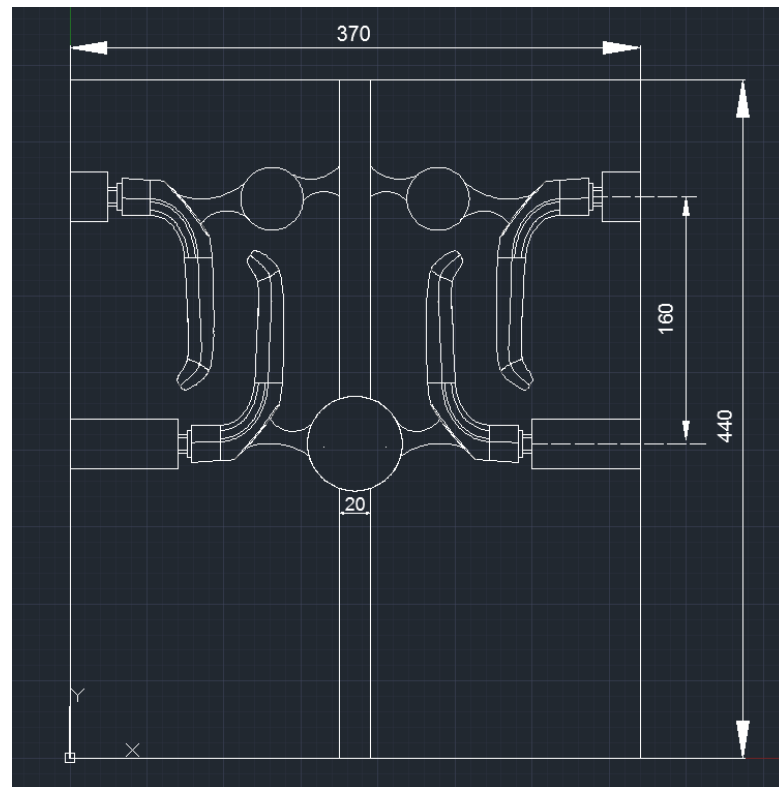


Figura 39: Desenho 2D do layout 2 realizado no software AutoCAD 2014.

As vantagens e desvantagens da utilização do *layout 2* são:

- Vantagens:
 - Fundição simultânea de quatro puxadores;
 - Ataque às peças realizado na zona plana dos puxadores;
 - Gradiente de tensões de origem térmica simétrico;
- Desvantagens:
 - Não é possível a utilização do sistema de movimentação de machos pré-existente (distância ente machos de aproximadamente 160 mm);
 - Possivelmente a qualidade final das duas peças superiores seria bastante díspar daquelas localizadas na zona inferior: além das condições de alimentação serem diferentes, em termos de enchimento as peças superiores poderão estar sujeitas a uma eventual queda de metal, enquanto que nas inferiores este facto não se verifica. Ao afinar o processo, na tentativa de aumentar a qualidade final

das peças, ao ajustar certos parâmetros que permitiriam obter duas peças de grande qualidade na zona superior, prejudicar-se-ia provavelmente a qualidade global das peças inferiores, ou vice-versa;

Comparativamente ao *layout 1*, esta solução não permite utilizar o sistema de movimentação de machos pré-existente, sendo para este caso necessária uma distância aproximada de 160 mm entre os eixos dos hidráulicos (superior aos 53 mm possíveis). Acrescido a esse facto, existe a possível desigualdade na qualidade final entre as duas peças superiores e as inferiores.

Pelos dois motivos de elevada relevância anteriormente referidos, o *layout 1* tem prioridade relativamente ao *layout 2*.

Layout 3

Apresenta-se na Figura 40 a versão do layout nº 3.

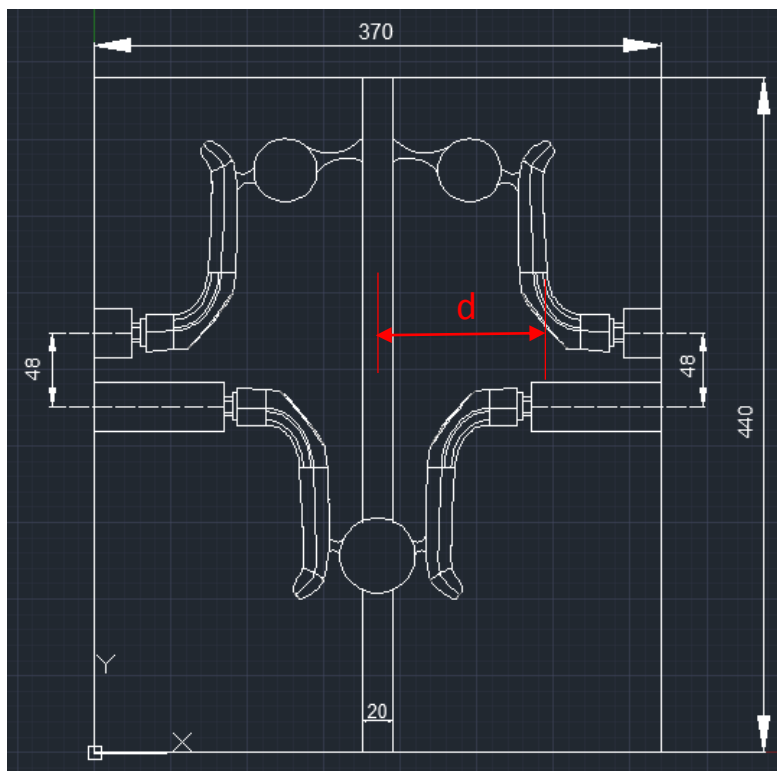


Figura 40: Desenho 2D do layout 3 realizado no software AutoCAD 2014.

As vantagens e desvantagens da utilização do *layout 3* são:

- Vantagens:
 - Fundição simultânea de quatro puxadores;
 - Gradiente de tensões de origem térmica simétrico;
 - Possibilidade de utilização do sistema de movimentação de machos pré-existente.

- Desvantagens:
 - Possivelmente a qualidade final das duas peças superiores seria bastante díspar daquelas localizadas na zona inferior (pela mesma razão explicitada na versão do *layout 2*);
 - O ataque às peças que se localizam na parte superior não poderá ser realizado na zona plana dos puxadores, isto porque o metal teria de percorrer uma longa distância (identificada na Figura 40 com a letra "d") entre o gito e as peças, aumentando a probabilidade do aparecimento defeitos. Contrariamente à alimentação das peças superiores, a alimentação das peças inferiores podia ser realizada na zona plana, não o tendo sido por uma questão de igualdade na zona de ataque a todas as peças;

Devido às desvantagens apresentadas anteriormente, particularmente a última referida, o *layout 3* terá menos interesse face ao *layout 1*.

Layout 4, 5 e 6

Os layouts apresentados nas Figuras 41, 42 e 43, constituem três das possíveis configurações para a fundição simultânea de apenas duas peças. Devido à diminuição óbvia da produtividade associada à fundição de dois puxadores, comparativamente com a opção de quatro (presente nas anteriores configurações), as configurações que serão apresentadas não foram alvo de análise posterior. Entre o *layout 4* e o *layout 6* apenas existe a alteração do local de ataque às peças, realizado na zona plana da quadra (*layout 4*) ou na zona do manípulo (*layout 6*).

Layout 4

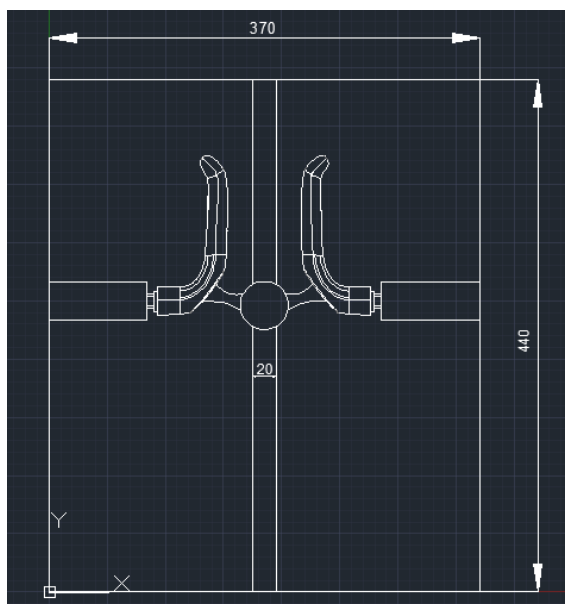


Figura 41: Desenho 2D do layout 4 realizado no software AutoCAD 2014.

Layout 5

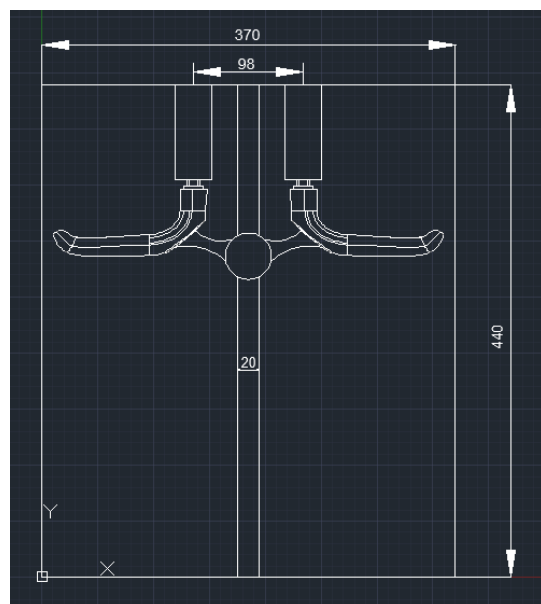


Figura 42: Desenho 2D do layout 5 realizado no software AutoCAD 2014.

Layout 6

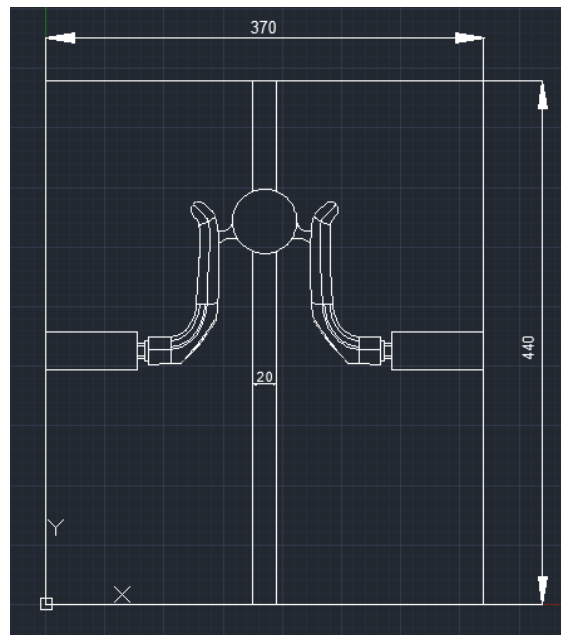


Figura 43: Desenho 2D do layout 6 realizado no software AutoCAD 2014

Depois da análise e discussão dos diferentes *layouts*, e por todas as razões anteriormente referidas, escolheu-se o layout 1 (na orientação original e na rodada em 180°) para realização de uma especificação detalhada dos sistemas de gitagem e alimentação.

De acordo com a pesquisa bibliográfica realizada, a coquilha deve ser produzida em aço AISI H13 ou AISI H11, tendo-se optado pelo aço AISI H13, que possui propriedades mecânicas ligeiramente superiores (ver Tabela 5).

3.2.2 Projeto dos sistemas de gitagem e alimentação

Após a definição do *layout* 1 como configuração da cavidade da coquilha a adotar no projeto, é necessário definir um adequado dimensionamento dos sistemas de gitagem e alimentação. Esta fase do projeto tem o importante apoio da simulação de solidificação realizada no ProCAST. As simulações de solidificação permitem uma previsão dos resultados esperados na solidificação das peças, permitindo otimizar os sistemas de gitagem e alimentação ainda na fase de projeto. É natural que a identificação de determinados erros de projeto numa fase inicial, permitam minimizar o custo global do projeto da coquilha, comparativamente à hipótese desses erros apenas serem detetados na fase de produção das peças (onde seria necessário o ajuste da coquilha ou possivelmente até a produção de uma nova coquilha).

A estratégia seguida no dimensionamento dos sistemas de gitagem e alimentação centrou-se num sobredimensionamento dos gitos e alimentadores, com posterior ajuste da sua

dimensão/configuração até que as condições ótimas sejam atingidas. Para cada nova alteração no projeto, foram realizadas novas simulações, permitindo comparar sucessivamente os resultados obtidos.

Relativamente à simulação numérica de solidificação, este tipo de simulação permite fundamentalmente obter resultados de dois tipos:

- Rechupes de solidificação (*Shrinkage porosity*): informação sobre a possível localização de rechupes aquando da solidificação dos fundidos;
- Tempo de solidificação (*Solidification time*): informação sobre tempo de solidificação de diferentes zonas das peças, dos alimentadores ou dos gitos;

3.2.2.1 Simulação numérica de solidificação - parâmetros do *software*

Previamente à realização das simulações em ProCAST, é necessário especificar o valor de diversos parâmetros de elevada importância, que se refletem na fiabilidade dos resultados finais. Esta fase deverá deste modo ser realizada com o maior rigor possível.

Essencialmente, é necessário definir os seguintes parâmetros:

- Composição química da liga;
- Propriedades térmicas da liga;
- Propriedades térmicas da coquilha;
- Coeficiente de transferência de calor entre o metal e a coquilha;
- Condições fronteira e parâmetros do processo.

Em primeira instância, é necessário estabelecer no *software* os parâmetros da liga AlMg4Zn, nomeadamente a composição da liga assim como alguns parâmetros térmicos da mesma. A especificação das propriedades térmicas da liga, assim como o valor de cada elemento de liga dentro de cada intervalo recomendado, realizou-se de acordo com as indicações dadas pelo ESI Group, fornecedor do ProCAST: enviou-se um pedido ao ESI Group para o fornecimento dos dados que melhor poderiam refletir o comportamento da liga em termos de simulações numéricas de enchimento e solidificação.

As percentagens dos elementos de liga que foram estabelecidas no *software* encontram-se apresentadas na Figura 44.

Composition	Thermal	Fluid	Stress	+
Property		Value		
Thermodynamic Computations				
Solid Diffusion Model		Scheil		
		Compute Properties		
<input type="checkbox"/> CAFE Computations				
Element		%Composition	Recommended Range(%)	
Base		Al		
Ag			0 ~ 0.5	
B			0 ~ 0.5	
C			0 ~ 0.5	
Cr			0 ~ 0.5	
Cu		0.08	0 ~ 5.5	
Fe		0.4	0 ~ 1	
Gd			0 ~ 0.5	
Ge			0 ~ 0.5	
Hf			0 ~ 0.5	
Li			0 ~ 0.5	
Mg		4	0 ~ 7.6	
Mn		0.25	0 ~ 1.2	
Ni		0.05	0 ~ 0.5	
Sc			0 ~ 0.5	
Si		0.4	0 ~ 17.5	
Sn		0.08	0 ~ 0.5	
Sr			0 ~ 0.5	
Ti		0.2	0 ~ 0.5	
V			0 ~ 0.5	
Y			0 ~ 0.5	
Zn		1.1	0 ~ 8.1	
Zr			0 ~ 0.5	

Figura 44: Composição da liga AG4Z estabelecida no ProCAST.

Os parâmetros térmicos da liga com necessidade de especificação encontram-se apresentados na Figura 45, onde a título de exemplo, é apresentada a curva da condutividade térmica em função da temperatura da liga. Do mesmo modo, existe a necessidade de estabelecer outras propriedades em função da temperatura, nomeadamente a densidade, entalpia e fração sólida. Para certas propriedades, em que o seu valor pode ser considerado constante com a temperatura, é apenas necessário a indicar o seu valor. Tal como anteriormente referido, todas as propriedades físicas foram estabelecidas de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante.

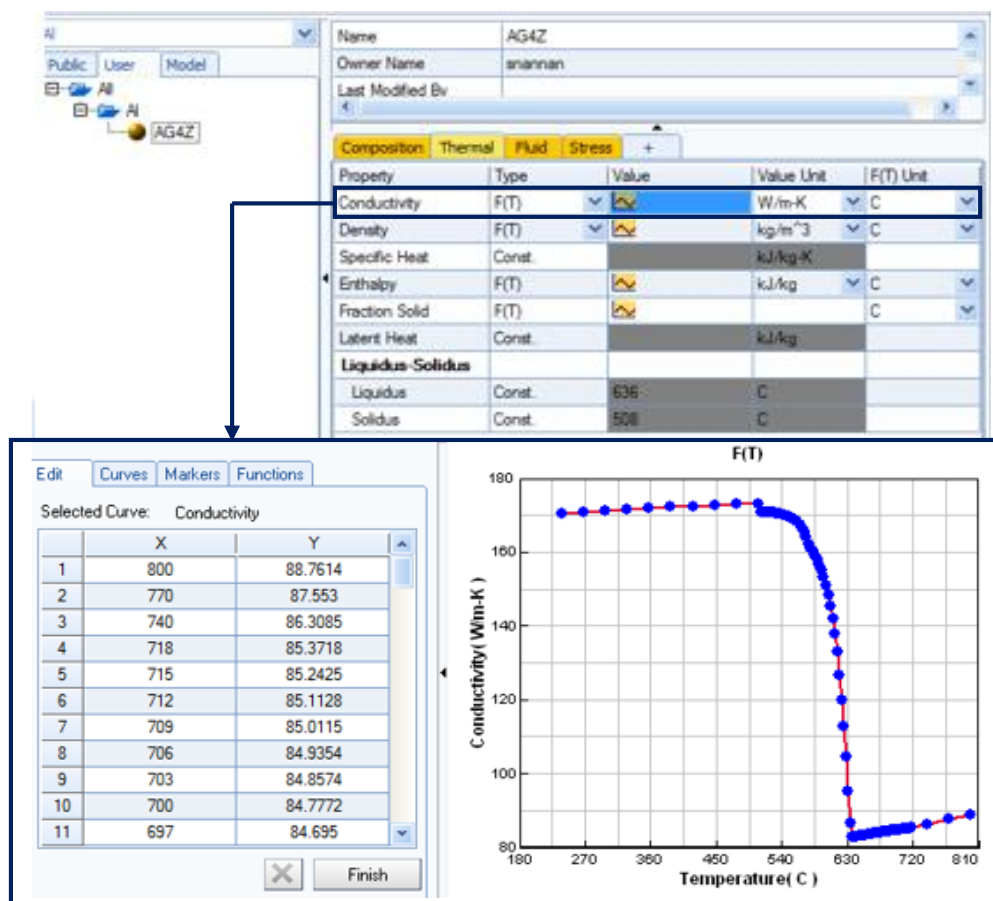


Figura 45: Parâmetros térmicos da liga AlMg4Zn, estabelecidos no ProCAST.

Relativamente às propriedades térmicas da coquilha, não foi necessário contactar o fabricante do *software* porque o material correspondente, o aço H13, já se encontra registado no catálogo do *software*.

Do mesmo modo, é necessário quantificar o fenómeno de transferência de calor entre a liga vazada e a coquilha. É sabido de antemão que existem diversos fatores que poderão provocar variações do fenómeno de transferência de calor: utilização de diferentes revestimentos ou espessuras de revestimento diferentes, pequenas variações na composição da liga de alumínio utilizada, entre outros fatores. Este parâmetro é relativamente difícil de quantificar, e existem inúmeros estudos académicos a decorrer relacionados com esta temática.

(Zhang 2001) estabelece uma relação entre a temperatura de vazamento de uma liga de alumínio-magnésio (A-356) e o coeficiente de transferência de calor, baseado na utilização de alguns dos revestimentos mais adotados na indústria de fundição, e com espessuras típicas de utilização.

Apresenta-se na Figura 46 a relação entre a temperatura da liga e o respetivo coeficiente de transferência de calor. A curva apresentada foi alvo de especificação no ProCAST.

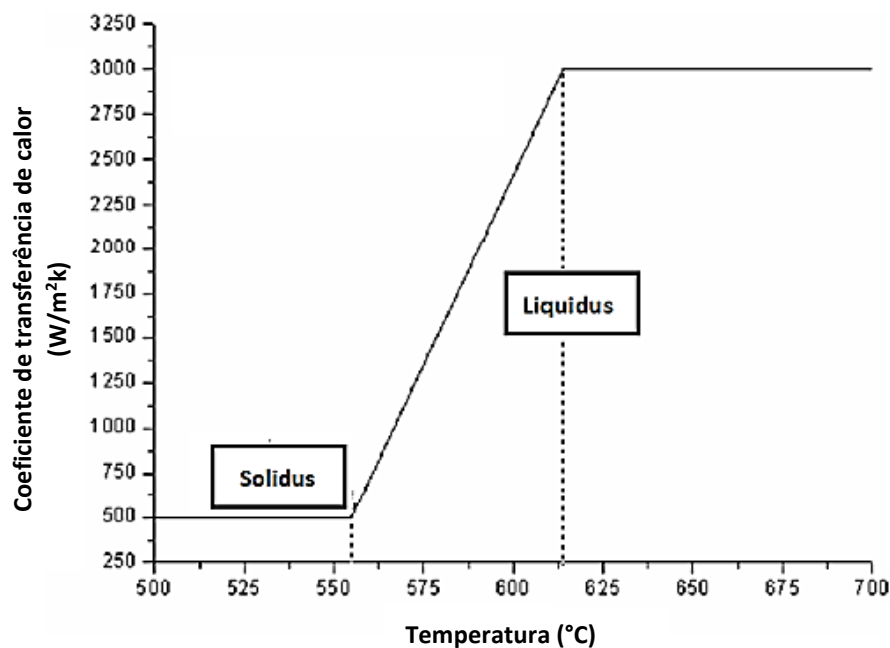


Figura 46: Coeficiente de transferência de calor (Zhang 2001).

O passo seguinte consiste na definição das condições fronteira e dos parâmetros intrínsecos ao processo. Estabeleceram-se como temperaturas iniciais da liga AlMg4Zn e da coquilha, 750 $^{\circ}C$ e 350 $^{\circ}C$, respetivamente. Esta combinação dos valores de temperatura de vazamento da liga e da coquilha pré-aquecida é uma combinação típica para a fundição em coquilha de ligas de alumínio, tal como referido anteriormente.

Pela enorme dificuldade de previsão do campo de temperaturas inicial na coquilha, ou até na própria liga, e por uma questão de simplificação da simulação no *software*, estes valores foram estabelecidos como sendo uniformes. Quanto aos parâmetros do processo propriamente ditos, a pressão foi definida com o valor de 1 bar, e o arrefecimento da coquilha realizado ao ar.

Após a definição de todos os parâmetros relacionados com a liga AlMg4Zn e com o material da coquilha, necessários à simulação da solidificação, é deste modo possível passar à fase de especificação detalhada da geometria da coquilha. Através do conceito gerado no *layout* 1, realizou-se o modelo 3D da coquilha no SolidWorks, importando-se posteriormente os dados para o *software* de simulação.

O modelo 3D gerado encontra-se apresentado na Figura 47.

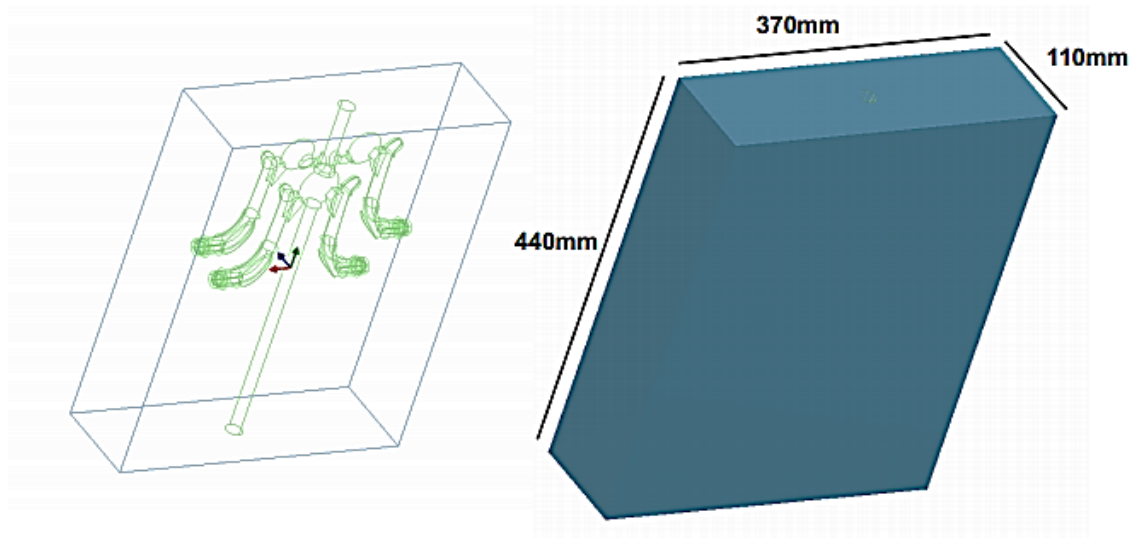


Figura 47: Dimensões iniciais da coquilha para a primeira simulação no ProCAST.

A primeira simulação comporta uma coquilha com a dimensão de 440 x 370 x 110 mm, onde o gito de enchimento foi especificado com 20 mm de diâmetro. Serão em seguida apresentados os cálculos relativos ao dimensionamento dos alimentadores, valores utilizados para a definição da geometria da cavidade do modelo apresentado na figura anterior.

3.2.2.2 Gitagem e alimentação 1 – princípios de conceito

Tal como apresentado na Figura 37, a alimentação das peças foi projetada de modo a que o alimentador inferior forneça metal às duas peças inferiores, contrariamente aos dois alimentadores superiores, cada um deles ligado unicamente a uma peça. Tal como anteriormente referido, serão utilizados alimentadores esféricos, uma vez que estes apresentam a geometria mais eficiente em termos de módulo de arrefecimento.

Para o cálculo do módulo de qualquer alimentador, deverá ser garantida a condição anteriormente explicitada na secção 2.5.1 deste trabalho, ou seja:

$$M_{alimentador} \geq k \times M_{peça} \quad \text{onde, } M_{peça} = \frac{V}{S}$$

Através do ficheiro 3D do puxador, poderá ser calculado o módulo da peça com base nos dados obtidos no SolidWorks. O *software* permite o cálculo do volume e da área superficial do modelo tridimensional. Na Figura 48 são apresentados os valores do volume e da área superficial da peça, calculados no SolidWorks.

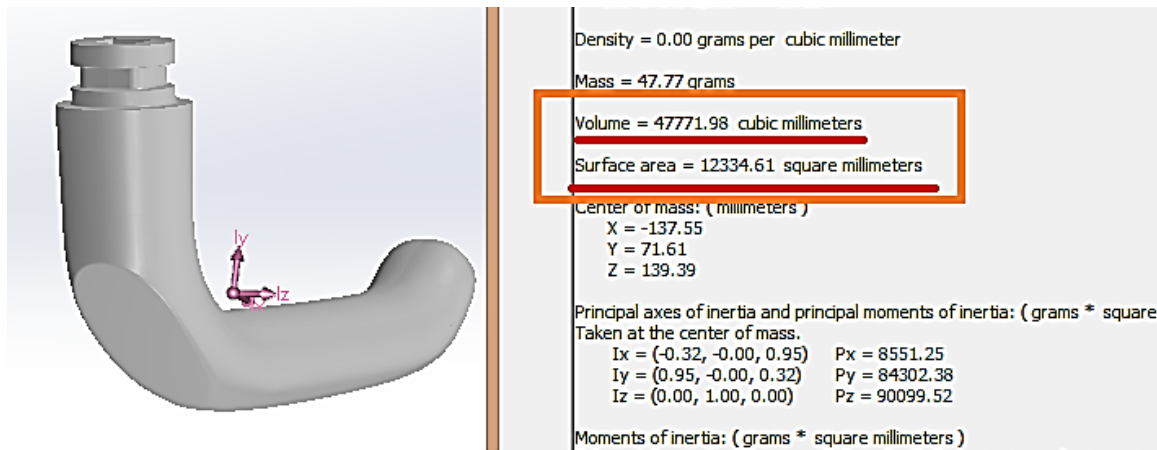


Figura 48: Volume e área superficial calculados no SolidWorks.

Assim sendo,

$$M_p = \frac{V}{S} = \frac{47771,98 \text{ mm}^3}{12334,61 \text{ mm}^2} = 3,873 \text{ mm} = 0,3873 \text{ cm}$$

Para calcular o módulo de cada alimentador, basta agora definir o valor do coeficiente de segurança a adotar. De acordo com a Tabela 17, o valor do coeficiente de segurança que deverá ser utilizado no caso do vazamento ligas leves é $k = 1,4$.

Logo,

$$M_{al,pequeno} \geq k \times M_p \Leftrightarrow M_{al,pequeno} \geq 1,4 \times 0,3873 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow M_{al,pequeno} \geq 0,5422 \text{ cm} \quad (1)$$

A condição anterior é apenas válida para os alimentadores de menor dimensão (alimentadores das duas peças do topo da coquilha). Para o alimentador de maior dimensão, e sendo que este alimenta simultaneamente duas peças, não foi encontrada na bibliografia qualquer referência ao modo de cálculo do seu módulo de arrefecimento. A experiência prática dita que neste tipo de configuração, o valor do módulo do alimentador deverá situar-se entre o valor do módulo calculado para a alimentação de apenas uma peça, e o dobro deste.

Deste modo,

$$0,5422 \leq M_{al,grande} \leq 2 \times k \times M_p \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow 0,5422 \leq M_{al,grande} \leq 1,0844 \text{ cm} \quad (2)$$

Tal como referido anteriormente, todos os alimentadores estarão sobredimensionados nesta fase, reduzindo-se o seu módulo até que os resultados sejam otimizados. A simulação no ProCAST funcionará como ferramenta de validação dos valores adotados para os módulos, sendo que à partida deverão cumprir as duas condições (1) e (2), anteriormente especificadas.

Na Tabela 18 encontram-se indicados os valores dos respetivos módulos dos alimentadores utilizados na simulação 1.

Um anterior projeto de uma coquilha para utilização no processo de FCR (para produção do mesmo puxador) serviu como base de apoio para este projeto. Os bons resultados obtidos serviram de base para o estabelecimento dos valores iniciais dos módulos dos alimentadores.

Tabela 18: Módulos dos alimentadores na gitagem número 1.

Parte	Raio do alimentador [cm]	Área de troca de calor [mm ²]	Volume [mm ³]	Módulo = V/S [cm]
Alimentador grande	2,7	91,61	82,45	0,90 (0,54 < 0,9 < 1,08)
Alimentadores pequenos	2,3	66,48	50,67	0,77 (0,77 > 0,54)

Além da geometria dos alimentadores, é necessário especificar a geometria dos ataques às peças. Devido ao facto de já terem sido projetados os ataques às peças, aquando do projeto da coquilha para a FCR, e de estes terem sido alvo de diversas correções levando à obtenção de resultados bastante satisfatórios, optou-se pela utilização de ataques com a mesma geometria. A alteração da geometria dos ataques permitiu corrigir uma habitual fissuração nas peças, transportando possíveis fissuras para os alimentadores.

Deste modo, serão apresentados os dados considerados para o projeto dos ataques:

- Espessura do ataque entre 10 a 11 mm (na direção normal à Figura 49);
- 360 mm² de secção na peça (área de contacto do ataque com a peça);
- 30 mm de comprimento na peça (corda correspondente ao comprimento do ataque na peça)

Na Figura 49 está representada a geometria dos ataques adotada no projeto, assim como uma imagem dos ataques reais na peça obtida por FCR.

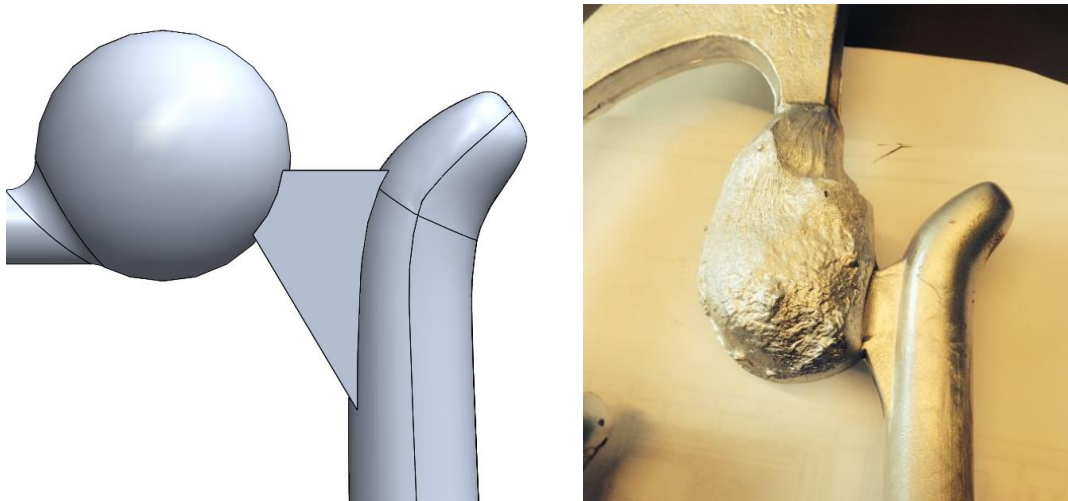


Figura 49: Geometria dos ataques adotada neste projeto (à esquerda) e geometria real dos ataques numa peça obtida por FCR (à direita).

Resumidamente, as especificações relativas ao primeiro sistema de gitagem e alimentação são:

- Módulo dos alimentadores pequenos: 0,77 cm;
- Módulo do alimentador grande: 0,9 cm;
- Gito de enchimento: Ø20 mm.

Previamente à simulação de solidificação, é possível calcular o rendimento, onde:

$$\text{Rendimento (\%)} = 100 \times \frac{\text{Peso de todas as peças limpas e sãs}}{\text{Peso total do metal vazado}}$$

A massa de uma peça poderá ser calculada através do produto da massa volúmica da liga AlMg4Zn pelo volume da peça. A mesma metodologia poderá ser adotada para o cálculo da massa dos gitos e alimentadores.

$$\text{Rendimento (\%)} = 100 \times \frac{4 \times V_{1\text{peça}} \times \rho_{\text{AlMg4Zn}} \times g}{(4 \times V_{1\text{peça}} + V_{\text{gitos e alimentadores}}) \times \rho_{\text{AlMg4Zn}} \times g}$$

Para o cálculo dos volumes, utilizou-se o SolidWorks.

É importante salientar que não é necessário que o metal ascenda e preencha completamente o gito de enchimento (até ao topo da coquilha), desde que a sua cota esteja a cima do topo dos alimentadores. Deste modo, estabeleceu-se o valor de 40 mm (a contar a partir do topo dos alimentadores) para o nível de enchimento da coquilha. Todos os cálculos relativos ao rendimento serão realizados tendo em conta o valor anteriormente referido. A cota máxima de enchimento e o respetivo volume dos sistemas de gitagem e alimentação encontram-se representados na Figura 50.

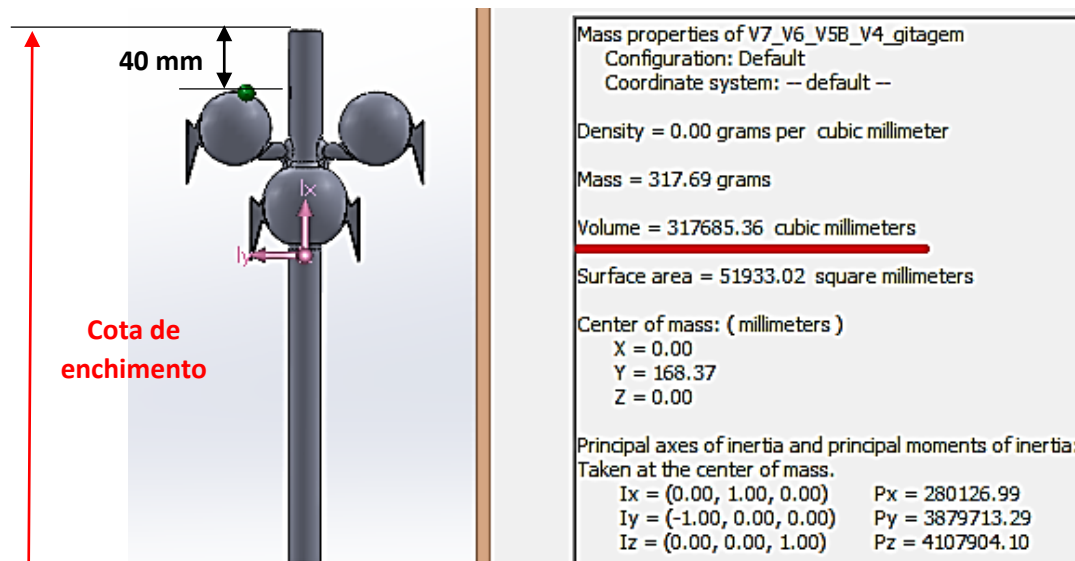


Figura 50: Cálculo do volume total da gitagem e alimentação e representação da cota de enchimento.

Logo, considerando um único vazamento e que todas as peças obtidas serão estão isentas de defeitos relevantes (peças sãs):

$$Rendimento (\%) = 100 \times \frac{4 \times 47772,98}{(4 \times 47772,98 + 317685,36)} = 37,5\%$$

É importante destacar que devido ao facto dos gitos e alimentadores estarem sobredimensionados nesta fase, o rendimento obtido será tendencialmente inferior ao rendimento máximo, obtido com a otimização do sistema de gitagem e alimentação.

Após a definição das geometrias dos sistemas de gitagem e alimentação, assim como a definição de todos os parâmetros necessários no *software* de simulação (já apresentados), o passo seguinte consiste em realizar a simulação de solidificação no ProCAST.

3.2.2.3 Gitagem e alimentação 1 - resultados e discussão da simulação numérica de solidificação

Serão apresentados os resultados relativos à primeira simulação realizada no ProCAST. Todas as simulações realizadas ao longo desta dissertação respeitarão o uso do conceito apresentado como *layout 1*. A primeira simulação é referente ao modelo de gitagem anteriormente dimensionado. Tal como já foi referido, os resultados das simulações de solidificação serão essencialmente de dois tipos:

- Rechupes de solidificação (*Shrinkage porosity*);
- Tempo de solidificação (*Solidification time*).

Na Figura 51 está representada a possível localização dos defeitos associados ao processo de solidificação, caso seja adotado o modelo de gitagem e alimentação nº1.

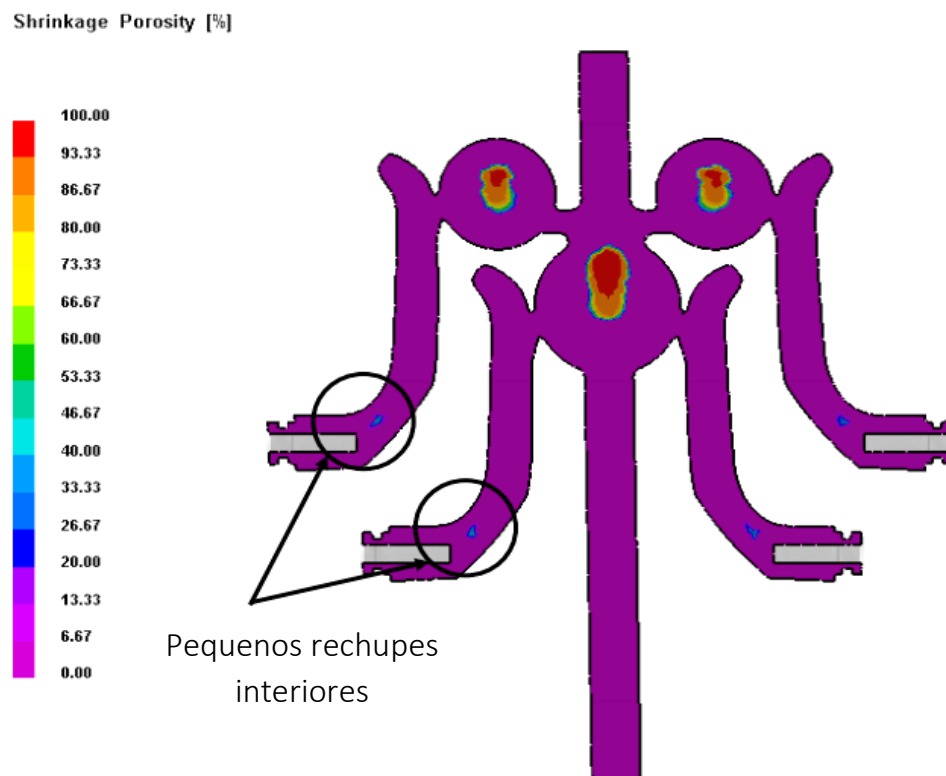


Figura 51: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 1, realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.

A simulação indica que é provável a existência de pequenos rechupes nas quatro peças, localizados entre a quadra e o manípulo, essencialmente na zona interna, local admissível para a localização dos mesmos. Caso a simulação revelasse defeitos na zona superficial dos puxadores, estes defeitos não seriam admissíveis devido ao carácter estético destas peças.

Na Figura 52 estão representados os resultados relativos ao tempo de solidificação (*solidification time*) do conjunto referente ao modelo de gitagem e alimentação nº1.

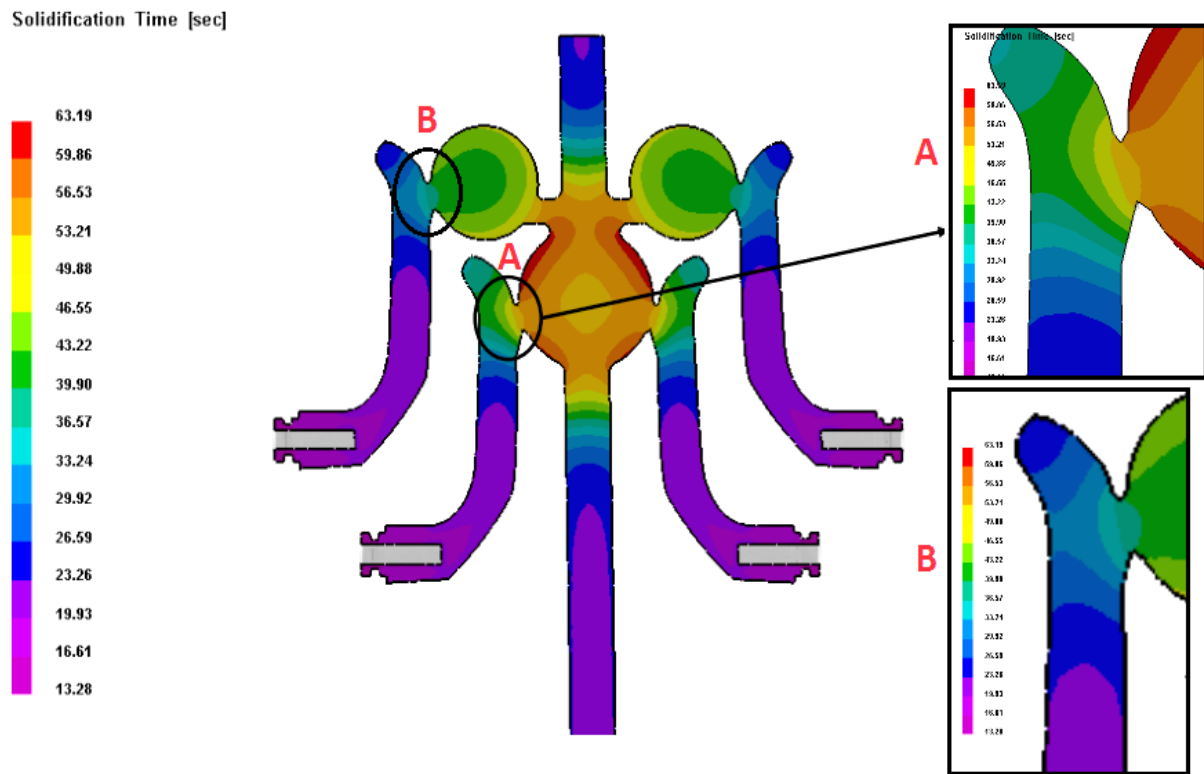


Figura 52: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 1, realizada no ProCAST: tempo de solidificação.

A partir da Figura 52 é possível concluir que tanto os alimentadores localizados na zona superior como o alimentador localizado na zona inferior têm tempos de solidificação superiores aos das peças às quais fornecem metal. Deste modo, a condição de alimentação é garantida até ao final da solidificação das peças.

É importante referir que as duas peças inferiores têm tempos de solidificação distintos das duas peças superiores (mas iguais duas a duas). O tempo decorrido até solidificar completamente uma peça inferior é aproximadamente 50 segundos, sendo que o tempo de solidificação do alimentador correspondente é 63,16 segundos. Relativamente às peças superiores, estas têm tempos de solidificação de aproximadamente 35 segundos, enquanto que os alimentadores correspondentes registam um tempo de solidificação de aproximadamente 50 segundos. Deste modo, a condição de alimentação é garantida até ao final da solidificação de todas as peças, e encontra-se discriminada abaixo.

$$\Delta tA = t_{sol, alimentador inferior} - t_{sol, peça inferior} = 63,19 - 50 = 13,19 \text{ s}$$

$$\Delta tB = t_{sol, alimentador superior} - t_{sol, peça superior} = 50 - 35 = 15 \text{ s}$$

$$\text{Tempo de ciclo} = \text{tempo de solidificação total do conjunto} = 63,19 \text{ s}$$

É sabido que os tempos de solidificação dos alimentadores deverão ser sempre superiores aos das peças, embora não deverão exceder em muito esses valores, de modo minimizar o tempo de ciclo do processo.

Devido aos resultados obtidos nesta simulação, que não prevêem a existência de defeitos relevantes relacionados com a alimentação de metal, assim como atribuem diferenças significativas entre os tempos de solidificação dos alimentadores e o das respectivas peças (sendo que as peças solidificam primeiro), realizaram-se novas simulações onde foram reduzidos os módulos dos alimentadores. Esta nova solução permitirá aumentar o rendimento e o tempo de ciclo do processo.

3.2.2.4 Gitagem e alimentação 2 – princípios de conceito

Na versão de gitagem e alimentação nº 2 apenas foram diminuídos os valores dos módulos dos alimentadores, sendo que tanto o diâmetro do gito de enchimento como a geometria dos ataques utilizados foram mantidos.

Na Tabela 19, encontram-se indicados os valores dos respectivos módulos dos alimentadores utilizados na simulação nº 2.

Tabela 19: Módulos dos alimentadores na gitagem número 2.

Parte	Raio do alimentador [cm]	Área de troca de calor [mm ²]	Volume [mm ³]	Módulo = V/S [cm]
Alimentador grande	2,5	78,54	65,45	0,83 (0,54 < 0,83 < 1,08)
Alimentadores pequenos	2,05	52,81	36,09	0,68 (0,68 > 0,54)

Através da redução do módulo dos alimentadores, o rendimento irá aumentar. Confirmando através dos respectivos cálculos e utilizando a informação apresentada na Figura 53:

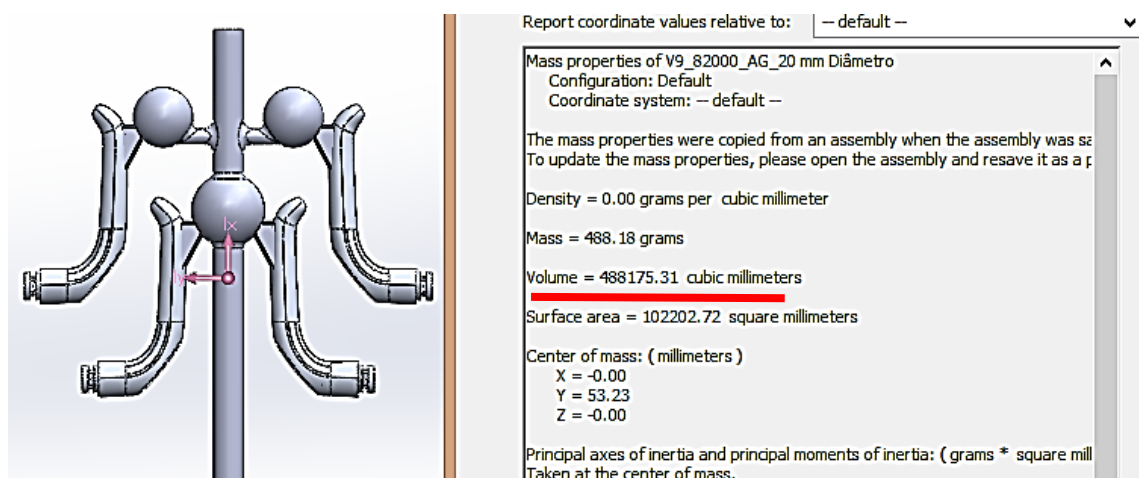


Figura 53: Volume total da gitagem e alimentação + peças, calculado no SolidWorks.

$$Rendimento (\%) = 100 \times \frac{4 \times V_{1peça}}{(4 \times V_{1peça} + V_{gitos e alimentadores})}$$

$$Vol \text{ gitos e alimentadores} + 4 \times V_{1peça} = 488175.31 \text{ mm}^3; V_{1peça} = 4772,98 \text{ mm}^3$$

$$Rendimento (\%) = 100 \times \frac{4 \times 4772,98}{488175.31} = 39,14\%$$

Através do sistema de gitagem e alimentação número 2, o rendimento subiu de 37,5% para 39,14%.

O valor do volume correspondente aos gitos e alimentadores calculou-se através mesma metodologia utilizada no modelo de gitagem e alimentação nº1, ou seja, com a utilização do SolidWorks. Para cálculos similares nas posteriores simulações de outros modelos, a metodologia seguida será a mesma.

3.2.2.5 Gitagem e alimentação 2 - resultados e discussão da simulação numérica de solidificação

Serão apresentados em seguida os resultados relativos à simulação do modelo de gitagem e alimentação nº 2, realizada no ProCAST. Na Figura 54 está representada a possível localização dos defeitos associados ao processo de solidificação.

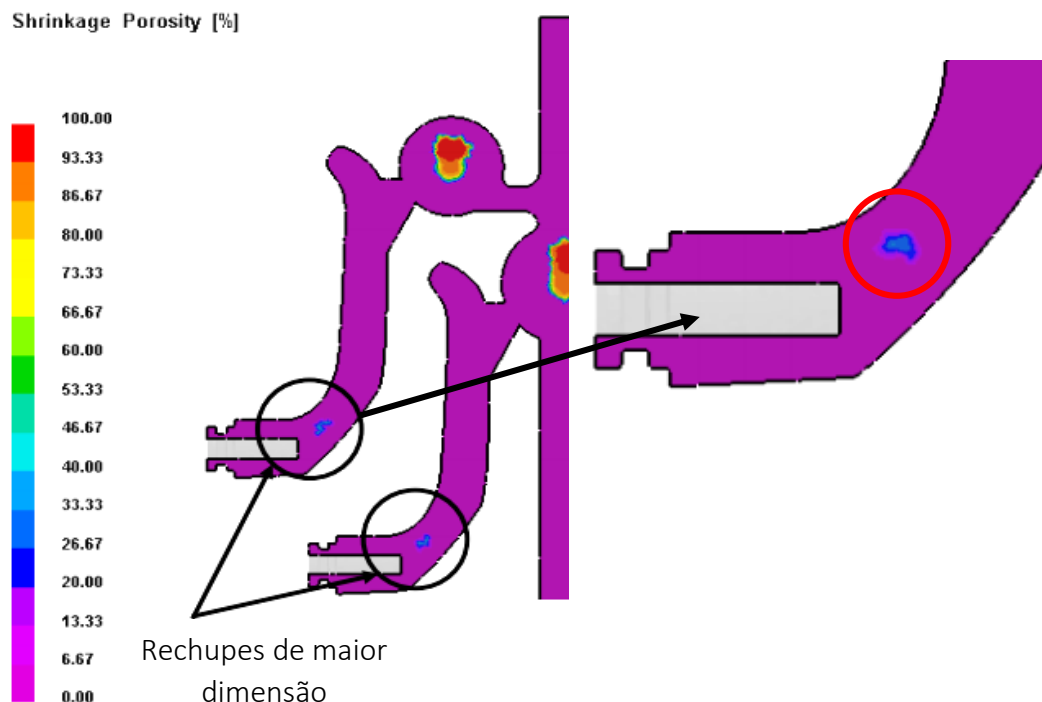


Figura 54: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 2, realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.

A simulação indica que é provável a existência de rechupes entre a quadra e o manípulo (assinalado a vermelho), rechupes de dimensão ligeiramente superior àqueles previstos na simulação com o modelo de gitagem e alimentação nº1. Estes rechupes, embora de dimensão superior aos anteriores, encontram-se essencialmente na zona interna, local admissível para a localização dos mesmos.

Na Figura 55 estão representados os resultados relativos ao tempo de solidificação do conjunto referente ao modelo de gitagem e alimentação nº2.

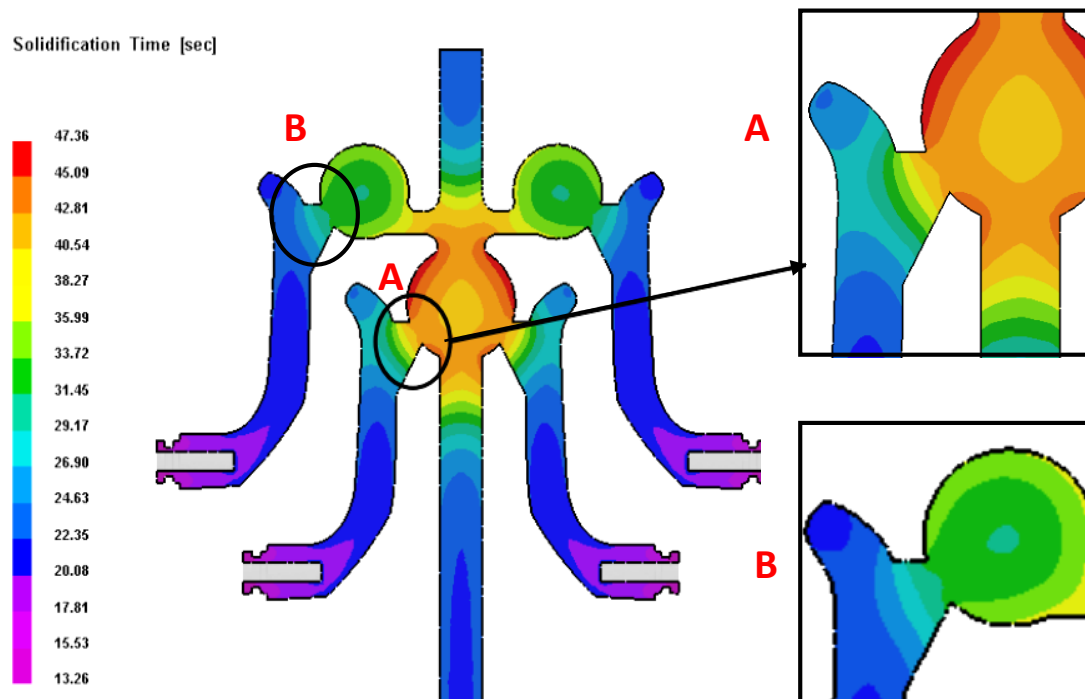


Figura 55: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 2, realizada no ProCAST: tempo de solidificação.

A partir da Figura 55 é possível concluir que tanto os alimentadores localizados na zona superior como o alimentador localizado na zona inferior têm tempos de solidificação superiores aos das peças às quais fornecem metal. Deste modo, a condição de alimentação é garantida até ao final da solidificação das peças, onde:

$$\Delta tA = t_{sol, alimentador inferior} - t_{sol, peça inferior} = 47,36 - 35 = 12,36 \text{ s}$$

$$\Delta tB = t_{sol, alimentador superior} - t_{sol, peça superior} = 40 - 27 = 13 \text{ s}$$

$$\text{Tempo de ciclo} = \text{tempo de solidificação total do conjunto} = 47,36 \text{ s}$$

Através da passagem do modelo de gitagem e alimentação nº1 para o respetivo nº2, o rendimento aumentou 1,64% (de 37,5% para 39,14%). Foi do mesmo modo possível diminuir

o tempo de ciclo do processo em 15,83 segundos (63,19 segundos para 47,36 segundos). A redução do módulo dos alimentadores revelou nesta fase um ligeiro impacto na qualidade final prevista dos fundidos, na medida em que os rechupes previstos na simulação nº 2 são ligeiramente superiores aos da primeira simulação. De qualquer modo, a dimensão e localização dos defeitos é perfeitamente admissível.

3.2.2.6 Gitagem e alimentação 3 – princípios de conceito

No modelo da gitagem e alimentação nº 2, o rendimento global situa-se próximo de 40%. Com o objetivo de otimizar este valor, realizou-se um novo modelo de gitagem, desta vez com $\varnothing 10\text{ mm}$ no gito de enchimento (em vez de $\varnothing 20\text{ mm}$). A diminuição do valor do gito de enchimento poderá acarretar problemas, nomeadamente a solidificação prematura da liga. Para uma melhor perceção do impacto desta alteração na qualidade dos fundidos, é clara a importância da simulação do modelo da gitagem e alimentação nº3. Neste modelo, todos os alimentadores e ataques possuem a mesma dimensão e geometria do modelo anterior.

Calculando o rendimento global correspondente ao modelo de gitagem e alimentação nº 3:

$$\text{Rendimento (\%)} = 100 \times \frac{4 \times V_{1\text{peça}}}{(4 \times V_{1\text{peça}} + V_{\text{gitos e alimentadores}})}$$

$$Vol_{\text{gitos e alimentadores}} + 4 \times V_{1\text{peça}} = 377862,47\text{ mm}^3; V_{1\text{peça}} = 4772,98\text{ mm}^3$$

$$\text{Rendimento (\%)} = 100 \times \frac{4 \times 4772,98}{377862,47} = 50,57\%$$

Deste modo, a passagem do modelo de gitagem nº 2 para o modelo de gitagem nº 3, revelou um aumento de 11,43% no aproveitamento global. Como apenas foi alterado o valor do gito de enchimento entre as duas versões, conclui-se que a redução do diâmetro deste gito tem uma elevada influência no rendimento global.

3.2.2.7 Gitagem e alimentação 3 - resultados e discussão da simulação numérica de solidificação

Serão apresentados em seguida os resultados relativos à simulação do modelo de gitagem e alimentação nº3, realizada no ProCAST. A Figura 56 e a Figura 57 apresentam os resultados da possível localização de rechupes e do tempo de solidificação do conjunto, respetivamente.

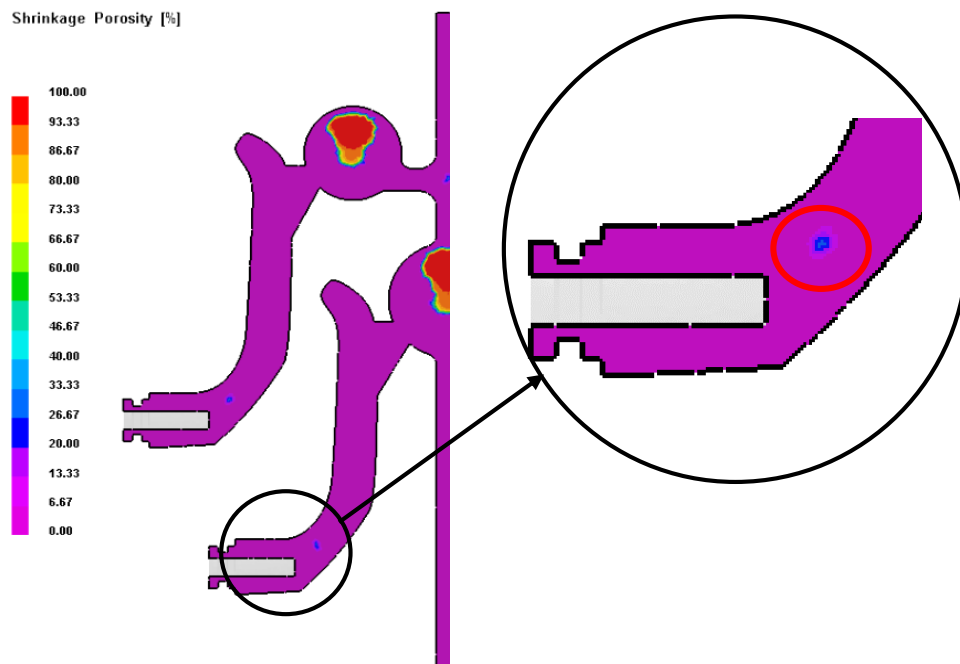


Figura 56: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 3, realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.

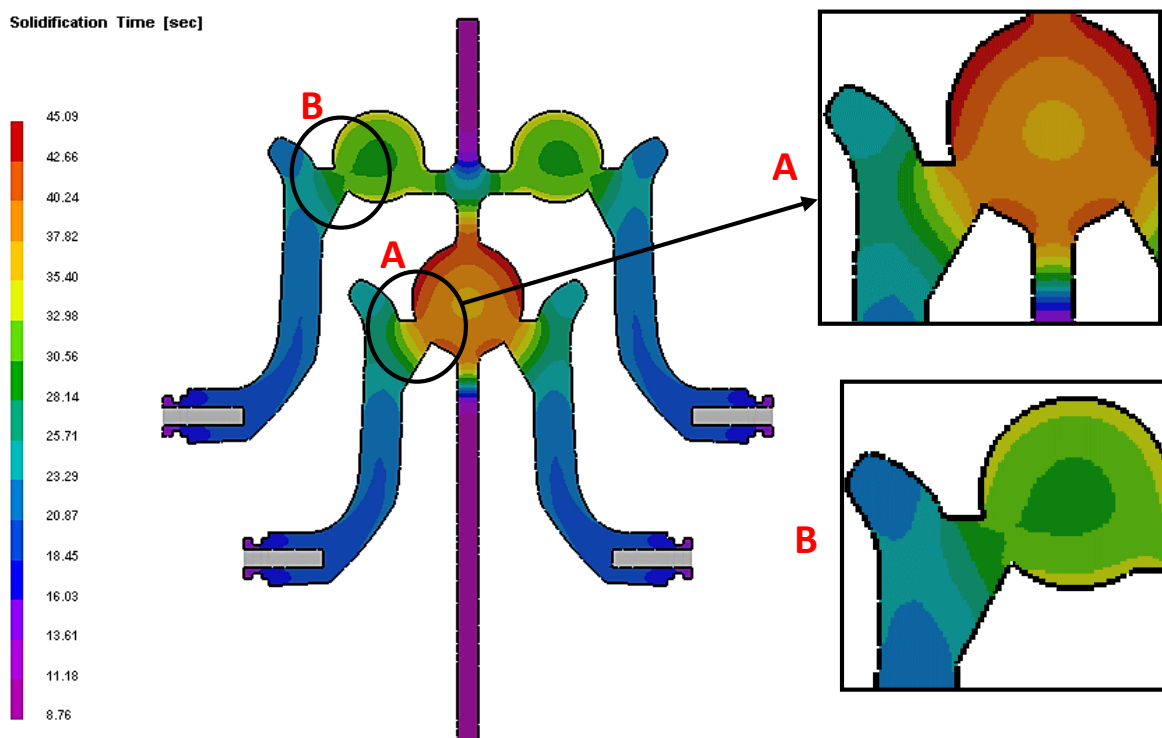


Figura 57: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 3, realizada no ProCAST: tempo de solidificação.

Através da análise da Figura 56, é possível identificar que os rechupes se localizam sensivelmente no mesmo local (assinalado a vermelho) e com a dimensão aproximadamente igual à da simulação anterior. Deste modo, é possível concluir que em termos de rechupes, a qualidade final dos fundidos não sofrerá uma alteração mensurável na utilização de um gito com metade do diâmetro (10 mm), comparativamente com o valor considerado anteriormente (20 mm).

Relativamente à análise dos tempos de solidificação, apresentada na Figura 57, é possível concluir que os tempos de solidificação dos alimentadores se mantêm superiores aos das respetivas peças. Discriminando os valores dos tempos de solidificação:

$$\Delta tA = t_{sol, alimentador inferior} - t_{sol, peça inferior} = 45,09 - 33 = 12,09 \text{ s}$$

$$\Delta tB = t_{sol, alimentador superior} - t_{sol, peça inferior} = 33 - 28 = 11 \text{ s}$$

$$\text{Tempo de ciclo} = \text{tempo de solidificação total do conjunto} = 45,09 \text{ s}$$

Analogamente, é possível concluir que se regista uma diminuição de aproximadamente 2,3 segundos no tempo de ciclo do processo: 47,36 segundos para 45,09 segundos.

3.1.2.8 Gitagem e alimentação 4 – princípios de conceito

Realizou-se mais uma etapa na simulação de um modelo com uma alimentação de menor dimensão. Para o diâmetro do gito de enchimento, o valor de $\varnothing 10 \text{ mm}$ foi mantido, e os módulos dos alimentadores utilizados encontram-se, em teoria, muito próximos dos módulos mínimos que deverão ser considerados. Na Tabela 20 especificam-se os módulos dos alimentadores:

Tabela 20: Módulos dos alimentadores na gitagem número 4.

Parte	Raio do alimentador [cm]	Área de troca de calor [mm ²]	Volume [mm ³]	Módulo = V/S [cm]
Alimentador grande	2,01	50,77	34,01	0,67 (0,54 < 0,67 < 1,08)
Alimentadores pequenos	1,71	36,74	20,94	0,57 (0,57 > 0,54)

Calculando o rendimento global correspondente ao modelo de gitagem e alimentação nº 3:

$$\text{Rendimento (\%)} = 100 \times \frac{4 \times V_{1peça}}{(4 \times V_{1peça} + V_{gitos e alimentadores})}$$

$$Vol_{\text{gitos e alimentadores}} + 4 \times V_{1\text{peça}} = 317416,01 \text{ mm}^3; V_{1\text{peça}} = 4772,98 \text{ mm}^3$$

$$Rendimento (\%) = 100 \times \frac{4 \times 4772,98}{317416,01} = 60,2\%$$

Através da redução dos módulos dos alimentadores relativamente ao modelo de gitagem e alimentação nº3, torna-se possível aumentar o rendimento em 9,63%.

3.2.2.9 Gitagem e alimentação 4 – resultados e discussão da simulação numérica de solidificação

Serão apresentados em seguida os resultados relativos à simulação do modelo de gitagem e alimentação nº 4, realizada no ProCAST. A Figura 58 e a Figura 59 apresentam os resultados da possível localização de rechupes e do tempo de solidificação do conjunto, respetivamente.

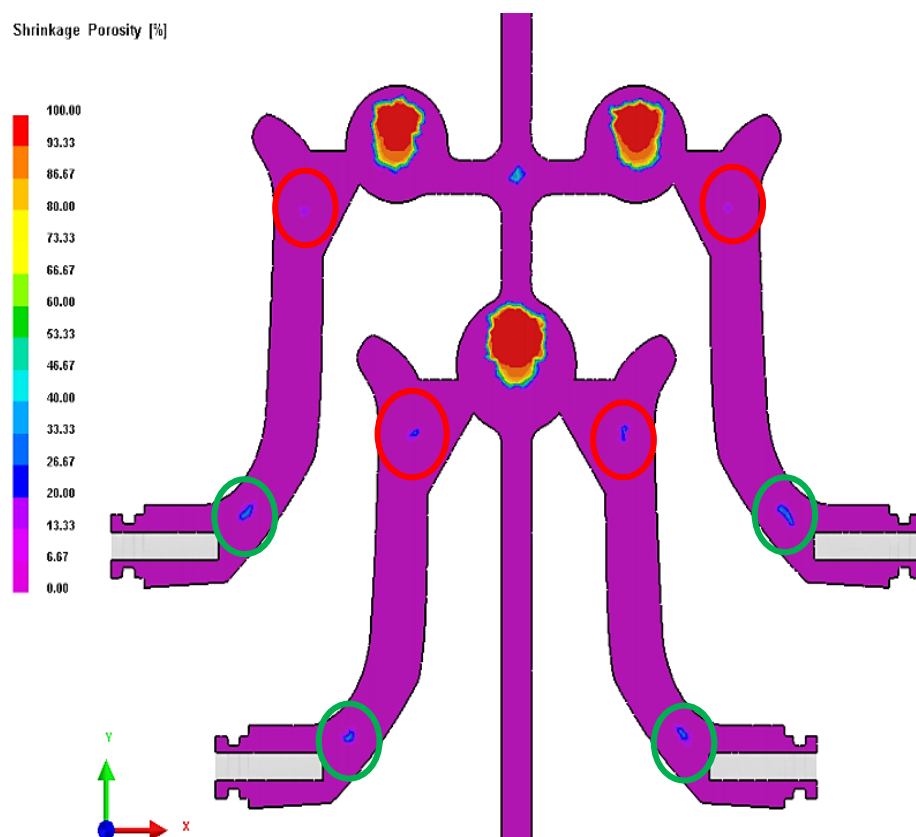


Figura 58: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 4, realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.

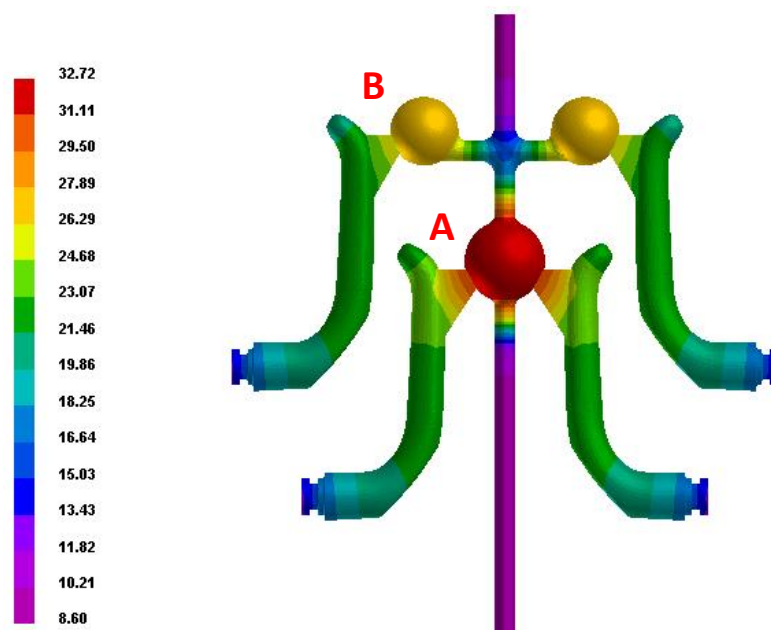


Figura 59: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 4, realizada no ProCAST: tempo de solidificação.

$$\Delta tA = 32,72 \text{ s} - 25 \text{ s} = 7,72 \text{ s} ; \Delta tB = 26 \text{ s} - 23 \text{ s} = 3 \text{ s} ; \text{Tempo de ciclo} = 32,72 \text{ s}$$

Os resultados da simulação nº 4 prevêem o aparecimento de rechupes na zona entre a quadra e o manípulo (identificados a verde na Figura 58) defeitos perfeitamente admissíveis e presentes em todas as simulações anteriores. Acrescido a este facto, prevê-se a existências de rechupes na zona do manípulo (identificados a vermelho na Figura 58), defeitos não admissíveis devido à proximidade da zona superficial do puxador. Por este motivo, e embora através deste modelo tenham sido otimizados o rendimento e o tempo de ciclo, o modelo de gitagem e alimentação nº4 não se apresenta válido.

De todos os parâmetros da gitagem e alimentação testados, aqueles que permitem obter os melhores resultados, são aqueles apresentados no tópico referente à gitagem e alimentação nº 3, seguidamente sintetizados na Tabela 21.

Tabela 21: Síntese dos parâmetros de especificação finais (gitagem e alimentação nº 3).

Parâmetros de especificação		
Gitagem e alimentação	Módulo dos alimentadores pequenos	0,68 mm
	Módulo do alimentador grande	0,83 mm
	Diâmetro do gito de enchimento	Ø10 mm
Ataques	Espessura	10 a 11 mm
	Secção na peça	360 mm ²
	Comprimento na peça	30 mm
Resultados		
Rendimento	50,57%	
Tempo de ciclo	45,09 segundos	

3.2.3 Rotação de 180° da coquilha

No decorrer das simulações realizadas, surgiu um conceito bastante relevante que poderá permitir a minimização da queda de metal, tal como anteriormente referida. Rodando em 180° a coquilha, já que o enchimento na FCBP é de baixo para cima, a situação da queda poderá ser minimizada. A orientação rodada de 180° encontra-se representada na Figura 60. Um possível ponto desfavorável desta nova opção é o facto dos alimentadores funcionarem em contra gravidade.

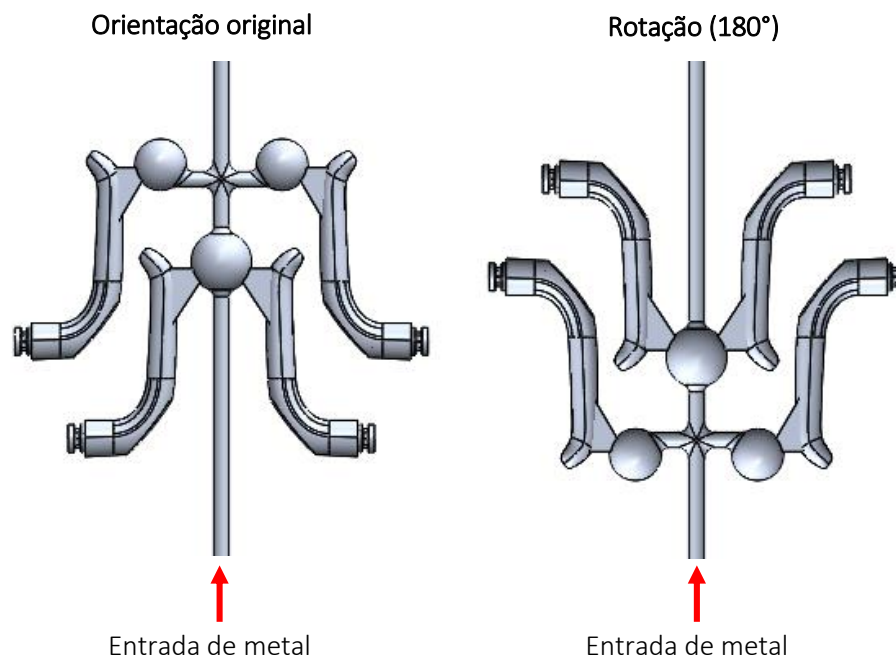


Figura 60: Representação do sistema de gitagem e alimentação do conjunto na orientação original e na orientação com rotação de 180°.

Como não existe qualquer alteração no desenho da coquilha, havendo apenas uma rotação de 180°, a coquilha poderá então ter duas posições de enchimento. Para isto, poderão ser colocados dois insertos, um em cada uma das extremidades da coquilha, que funcionarão como duas possíveis zonas de enchimento. Para qualquer uma das orientações, o inserto do lado correspondente ao enchimento estará aberto (e em contacto direto com o forno), sendo que o inserto do lado contrário poderá ser vedado através da utilização de um taco metálico. Deste modo, depois de uma fase de testes com a coquilha a trabalhar alternadamente nas duas posições, poderá ser possível concluir em qual das orientações os resultados são mais favoráveis.

Na prática, como a coquilha está fixa à coquilhadora, para alterar a orientação da coquilha apenas existe a necessidade de rodar a coquilhadora. O desenho representativo do funcionamento da coquilha nas duas posições consideradas, com inclusão dos dois insertos nas extremidades, encontra-se representado na Figura 61.

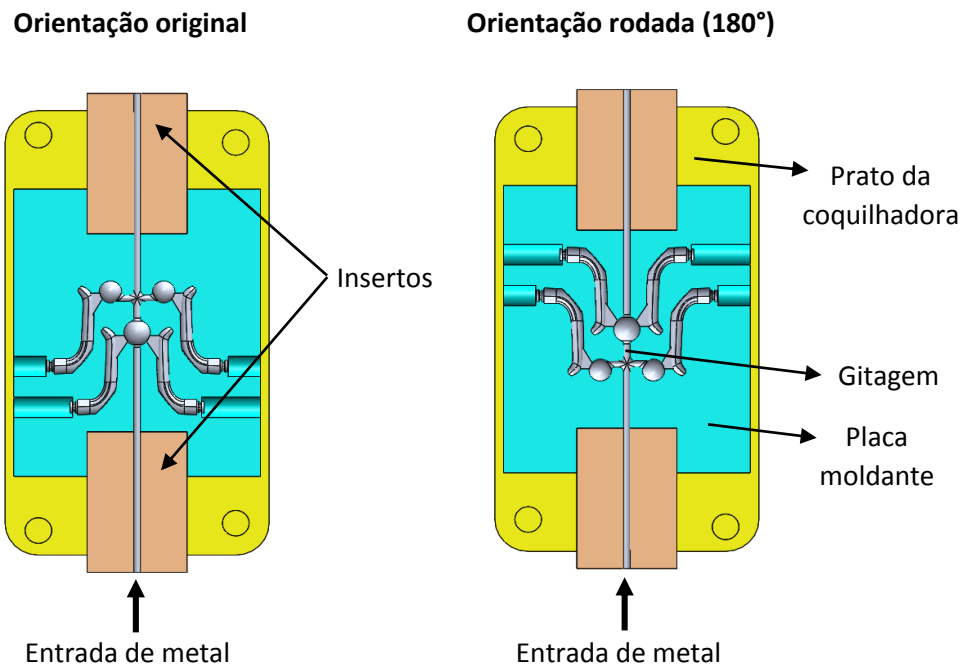


Figura 61: Desenho representativo do funcionamento do conjunto nas duas posições (original e com rotação de 180°).

Para a validação da nova ideia gerada, é importante realizar as simulações de solidificação desta nova orientação. Para o efeito, as geometrias da gitagem e alimentação que serão simuladas, correspondem àquelas em que foram obtidos os resultados mais favoráveis na orientação original, ou seja, a gitagem e alimentação nº 2 e nº 3. Para ambas as configurações rodadas, os rendimentos serão próximos, mas não iguais, aos obtidos nas orientações originais. Este facto deve-se a que para as configurações rodadas, o critério escolhido para a cota máxima de enchimento da coquilha (40 mm a contar a partir do topo dos alimentadores superiores) não é compatível com a nova orientação. Deste modo, como critério na orientação rodada, considerou-se o mesmo valor (40 mm), a contar a partir da cota limite dos puxadores.

Na Figura 62 faz-se a representação da cota de enchimento na orientação rodada em 180°.

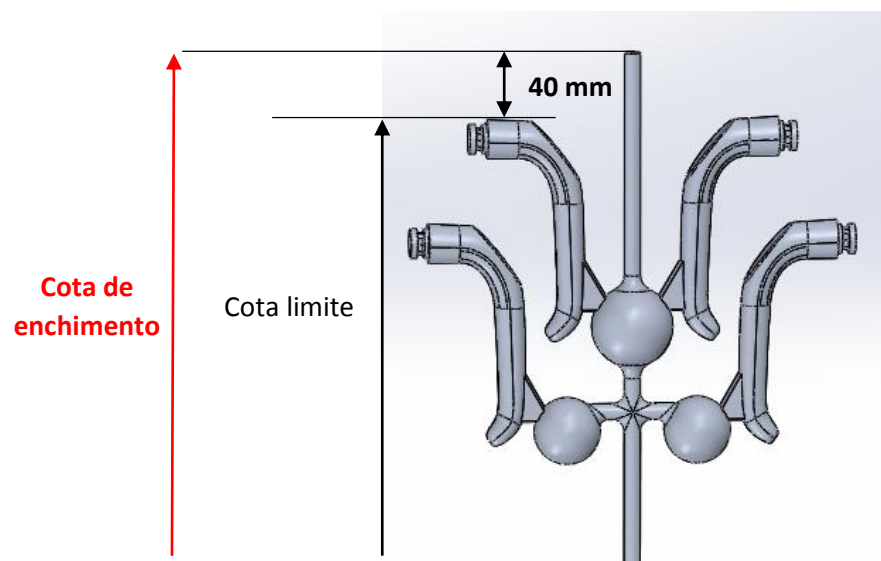


Figura 62: Representação da cota de enchimento na orientação rodada.

É importante destacar que relativamente à simulação de solidificação, os dados que o ProCAST fornece apenas permitem avaliar as condições de alimentação das peças. Para avaliar as condições de enchimento, ou seja, para estimar se a queda de metal poderá ser minimizada ou não com a solução rodada, será necessário realizar as simulações de enchimento.

Nesta fase, apenas serão consideradas as simulações de solidificação, que permitirão auferir se a alimentação se faz de modo eficaz quando os alimentadores funcionam em contra gravidade (orientação rodada). Para isso, serão apresentadas as simulações relativas à dimensão e localização de rechupes.

3.2.3.1 Gitagem e alimentação 2 (rodada em 180°) - resultados e discussão da simulação numérica de solidificação

A Figura 63 apresenta os resultados da possível localização de rechupes na orientação rodada do modelo de gitagem e alimentação nº 2.

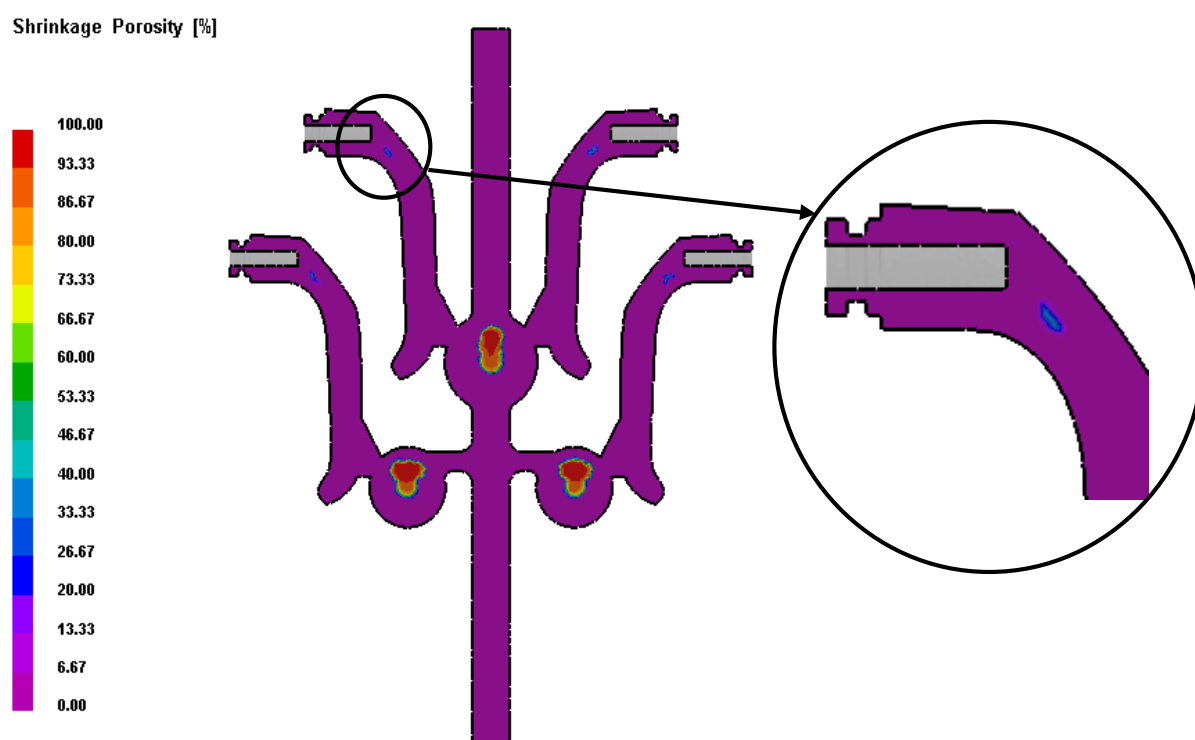


Figura 63: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 2, orientação rodada. Simulação realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.

Através da análise da Figura 63, e comparando com os resultados obtidos na simulação na orientação original (Figura 51), a dimensão dos rechupes é praticamente a mesma, não se denotando portanto qualquer diferença no que diz respeito à alimentação das peças.

3.2.3.2 Gitagem e alimentação 3 (rodada em 180°) – resultados e discussão da simulação numérica de solidificação

Estão representados na Figura 64, os resultados relativos à simulação de solidificação do modelo de gitagem e alimentação nº 3 rodado em 180°.

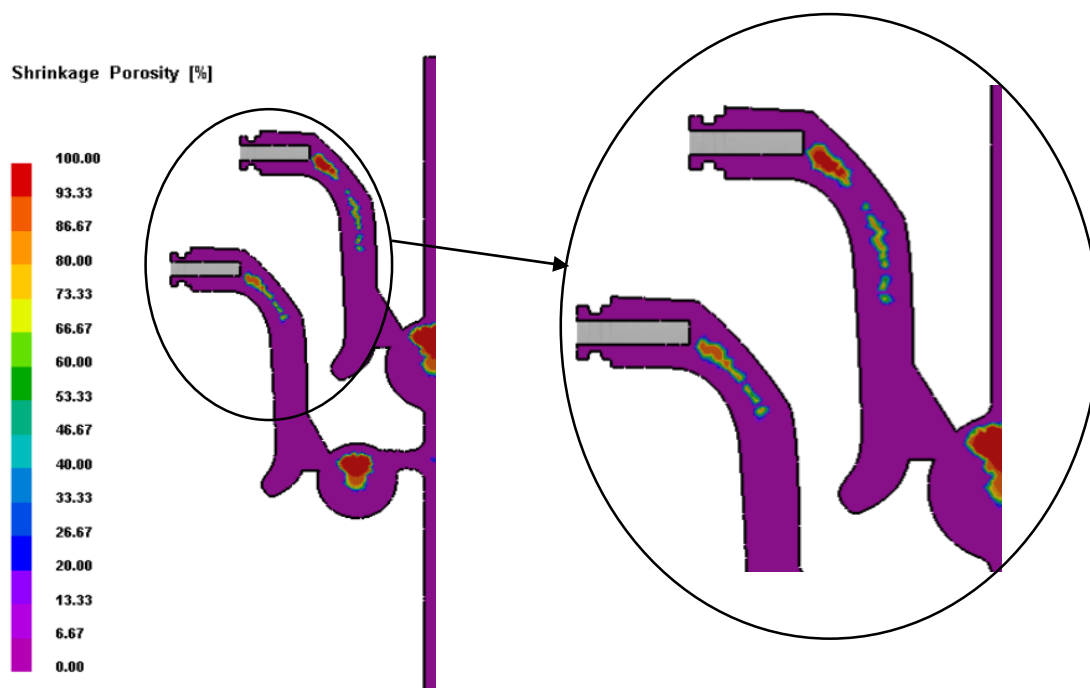


Figura 64: Resultados da simulação de solidificação da gitagem e alimentação nº 3, orientação rodada. Simulação realizada no ProCAST: rechupes de solidificação.

Através da análise da Figura 64, é possível concluir que a extensão dos rechupes prevista é bastante superior para a orientação rodada. Tal como esperado, a utilização dos alimentadores em contragravidade não permite uma alimentação tão eficaz, comparativamente com a anterior configuração. Embora este facto seja verdade, a simulação aponta para que estes defeitos se situem na zona interna do puxador, ou seja, numa zona admissível. Por este motivo, é esperado que para o atual modelo de gitagem e alimentação, a coquilha produza peças sem “rechupes críticos” caso a posição de trabalho seja a rodada em 180°.

3.2.4. Simulações de enchimento – apresentação e análise de resultados

Devido à sua complexidade, e ao tempo necessário à sua realização (muito superior às simulações de solidificação), apenas será realizada a simulação de enchimento relativa ao modelo da gitagem e alimentação que melhores resultados denota nas simulações de solidificação, ou seja, o modelo de gitagem e alimentação nº3 (orientação original e rodada em 180°). Este tipo de simulação permite tirar conclusões sobre as condições de enchimento das peças, nomeadamente se a queda de metal aquando da “orientação original” da coquilha poderá promover uma elevada turbulência. Serão em seguida apresentadas e analisadas as

simulações numéricas de enchimento para a ferramenta a trabalhar nas duas orientações possíveis (original e rodada em 180°).

Coquilha na orientação rodada em 180°

Apresentam-se nas Figuras 65 e 66, as velocidades registadas durante o enchimento da ferramenta na orientação rodada em 180°.

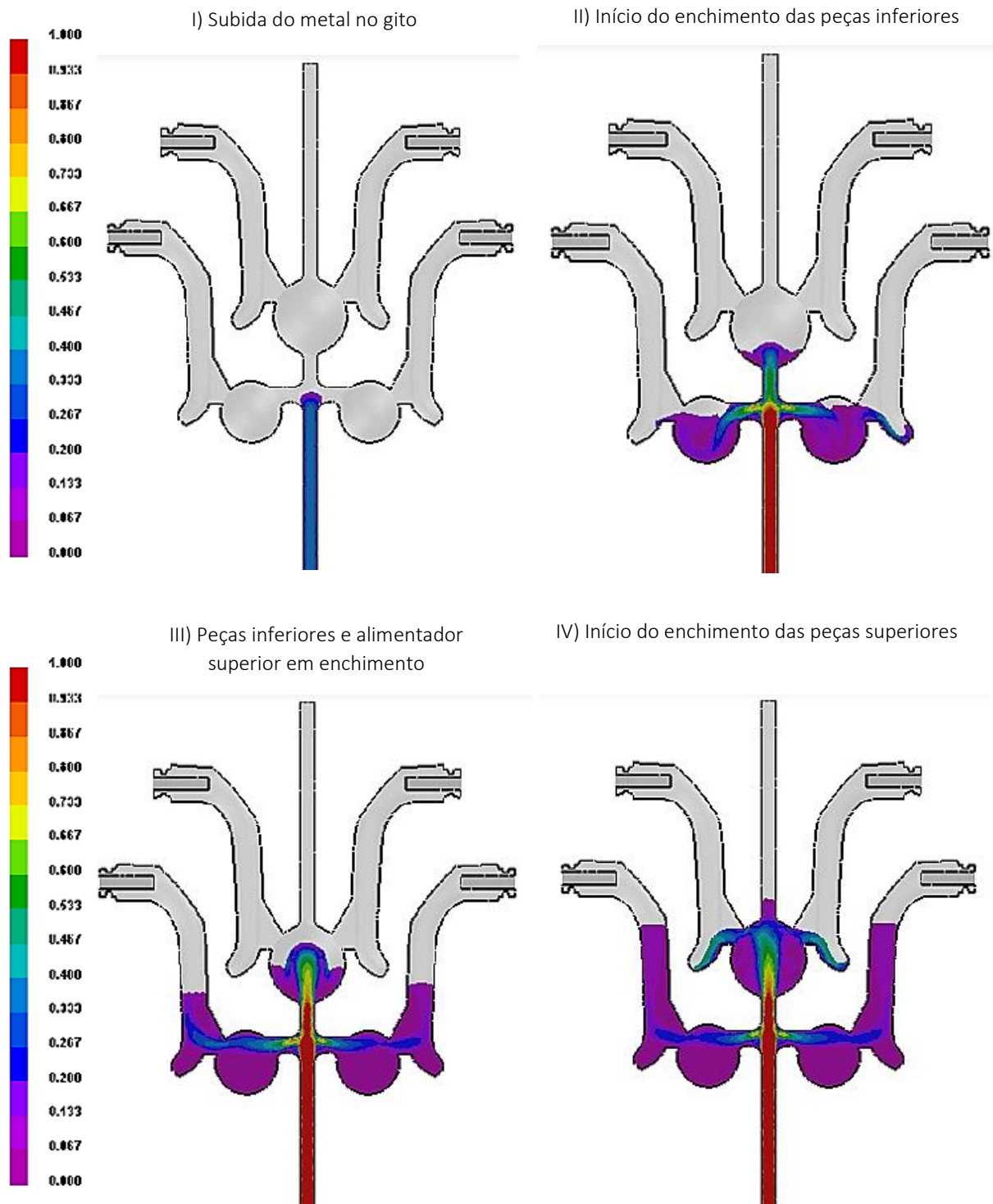


Figura 65: Resultados da simulação numérica de enchimento com a coquilha na orientação rodada: velocidades registadas durante o enchimento (fases I, II, III e IV).

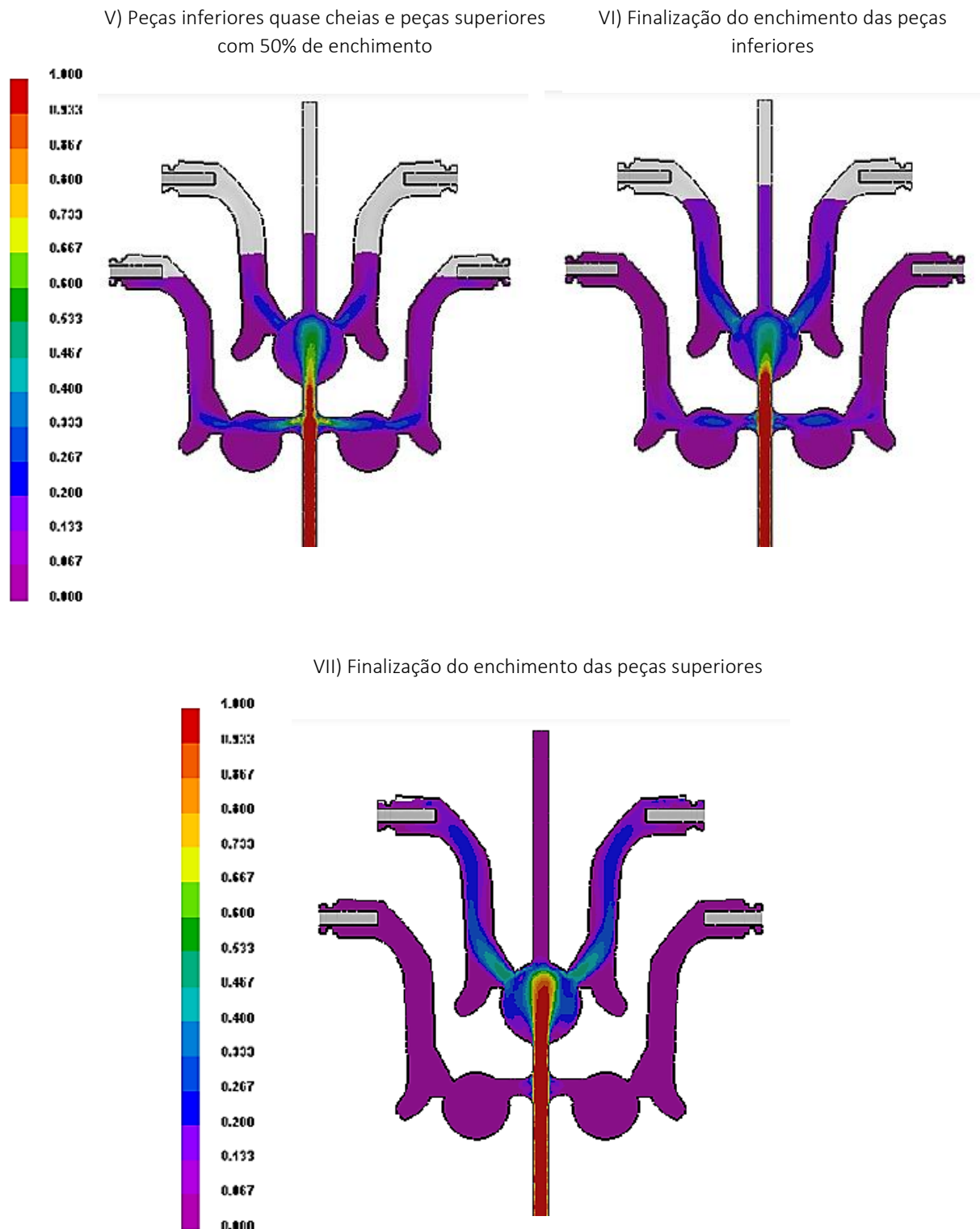


Figura 66: Resultados da simulação numérica de enchimento com a coquilha na orientação rodada: velocidades registradas no enchimento (fases V, VI e VII).

Às fases I, II, III, IV, V, VI e VII das Figuras 65 e 66, correspondem percentagens de enchimento da coquilha de 7%, 26,3%, 43,6%, 60,3%, 79%, 88,9% e 99,8%, respetivamente.

Coquilha na orientação original

Apresentam-se nas Figuras 67 e 68, as velocidades registadas durante o enchimento da ferramenta na orientação original.

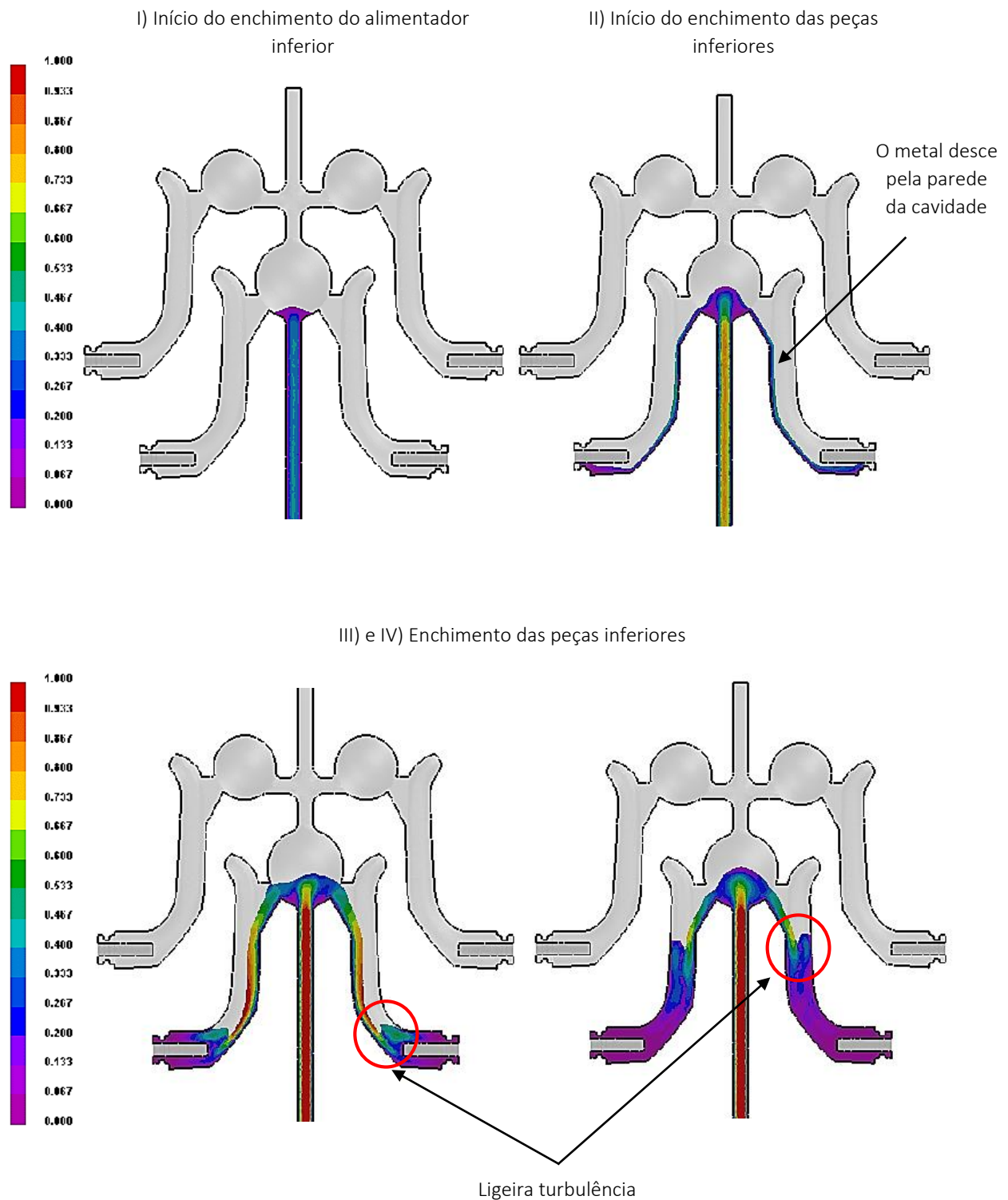


Figura 67: Resultados da simulação numérica de enchimento com a coquilha na orientação original: velocidades registadas no enchimento (fases I, II, III e IV).

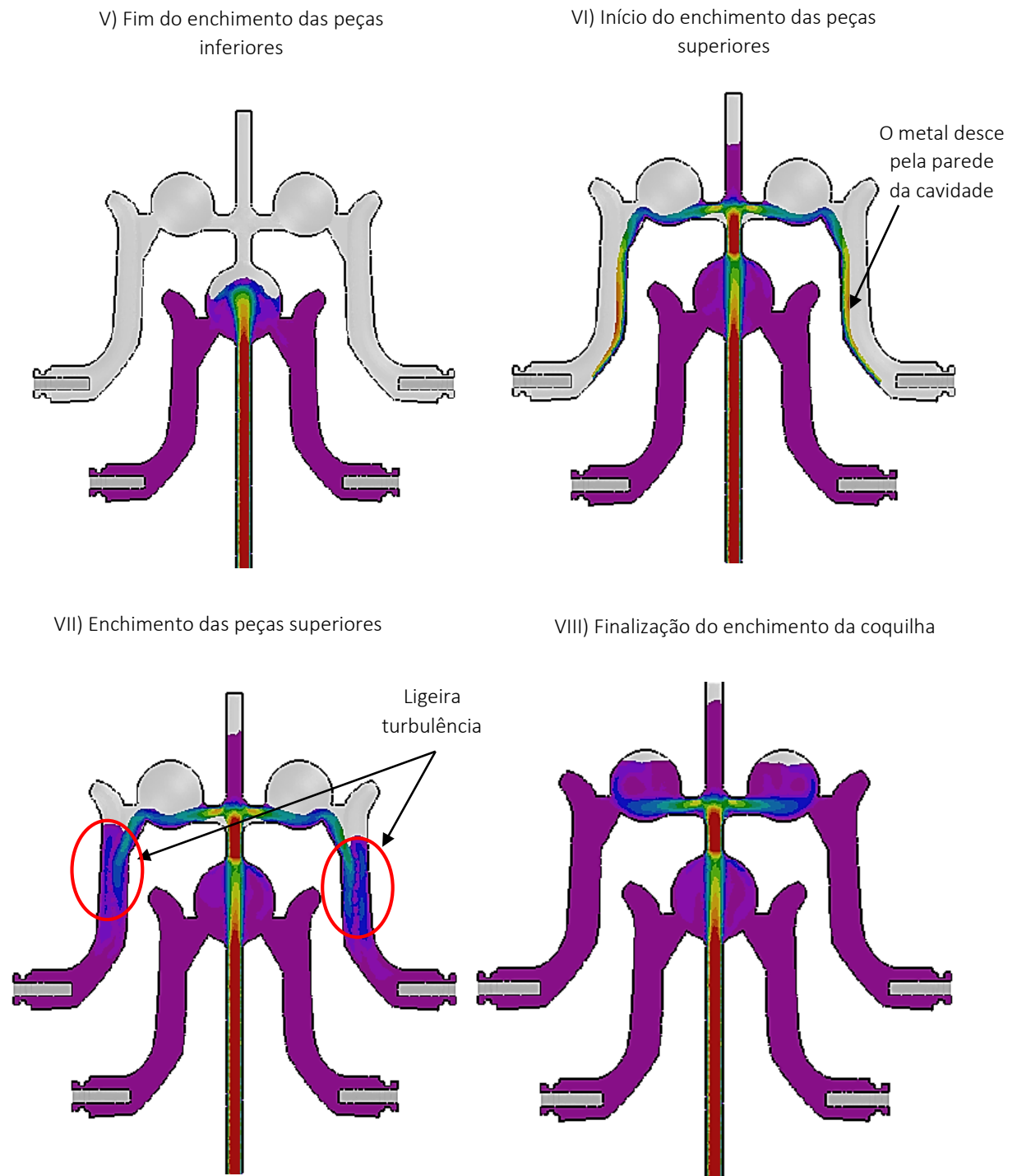


Figura 68: Resultados da simulação numérica de enchimento com a coquilha na orientação original: velocidades registadas no enchimento (fases V, VI, VII e VIII).

Às fases I, II, III, IV, V, VI, VII e VIII das Figuras 67 e 68, correspondem percentagens de enchimento da coquilha de 7,7%, 14,2%, 26,3%, 32%, 48%, 60%, 80%, 98,1%, respetivamente.

Na orientação rodada, a simulação numérica anteriormente apresentada nas Figuras 65 e 66, mostra que o enchimento das peças é realizado de forma suave e sem turbulência. Em qualquer instante, a velocidade de enchimento encontra-se perfeitamente controlada e abaixo de 0,5 m/s (limite estabelecido pelo critério de Niyama).

Na simulação referente ao enchimento segundo a orientação original da ferramenta, regista-se como velocidade máxima o valor de 1 m/s, aproximadamente o dobro da velocidade máxima de enchimento assinalada na orientação rodada. É importante referir que o metal preenche a zona da cavidade das peças através da sua descida pelas paredes da mesma, minimizando uma eventual queda direta de metal, que promoveria a geração de uma maior turbulência. Contudo, e contrariamente à simulação segundo a orientação rodada, verifica-se uma ligeira turbulência (na zona da quadra e entre a quadra e o manípulo), identificável nas Figuras 67 e 68.

Pelas razões anteriormente explicitadas, e comparando os dados obtidos nas duas simulações numéricas de enchimento, é possível afirmar que o enchimento da coquilha segundo a orientação rodada possibilitará uma melhoria das condições de enchimento das peças.

É importante referir que embora a turbulência registada segundo a orientação original seja de magnitude relativamente baixa, os dados obtidos no *software* não possibilitam concluir objetivamente se esta promoverá a formação de determinados defeitos. Destaca-se, deste modo, a grande importância das operações de teste para ambas as orientações de trabalho da coquilha.

3.3 Conceito e projeto de uma estrutura de adaptação de uma coquilhadora a um forno pré-existente no INEGI

Previamente ao projeto da estrutura de adaptação da coquilhadora ao forno, existe a necessidade de estabelecer um conjunto de requisitos que esta estrutura deverá garantir. O cumprimento de todos os pontos a seguir listados tem um importante papel no correto funcionamento da máquina, que se reflete na qualidade do produto final, na vida útil da estrutura assim como na penosidade do trabalho para o operador. Em suma, os requisitos que a estrutura deverá assegurar são:

- Correta fixação da coquilhadora à estrutura de suporte;
- Possibilidade de movimentação vertical da coquilhadora: em cada vazamento, a coquilhadora necessita de ser movimentada na vertical relativamente ao forno. Para isso, esta terá de realizar um movimento de descida, permitindo o posicionamento da coquilha no bico do forno. É realizado o enchimento da peça, a coquilhadora sobe e é aberta a coquilha. A abertura da coquilha é garantida pelo acionamento do prato móvel da coquilhadora. A cada novo enchimento, a coquilha fecha, repetindo-se novamente todo o processo;
- A estrutura deverá ser suficientemente rígida para suportar as cargas à qual está sujeita, sem prejuízo para a vida útil da mesma;
- Possibilidade de rotação da coquilhadora para enchimento em duas posições distintas;
- Possibilidade de movimentação da estrutura para enchimento do forno;
- A extração dos fundidos deverá ser realizada sem grande dificuldade, minimizando a probabilidade de danificação das peças, assim como minimizando a penosidade associada ao trabalho do operador;

O forno pré-existente nas instalações do INEGI, assim como a coquilhadora proveniente da STA, são apresentados na Figura 69.

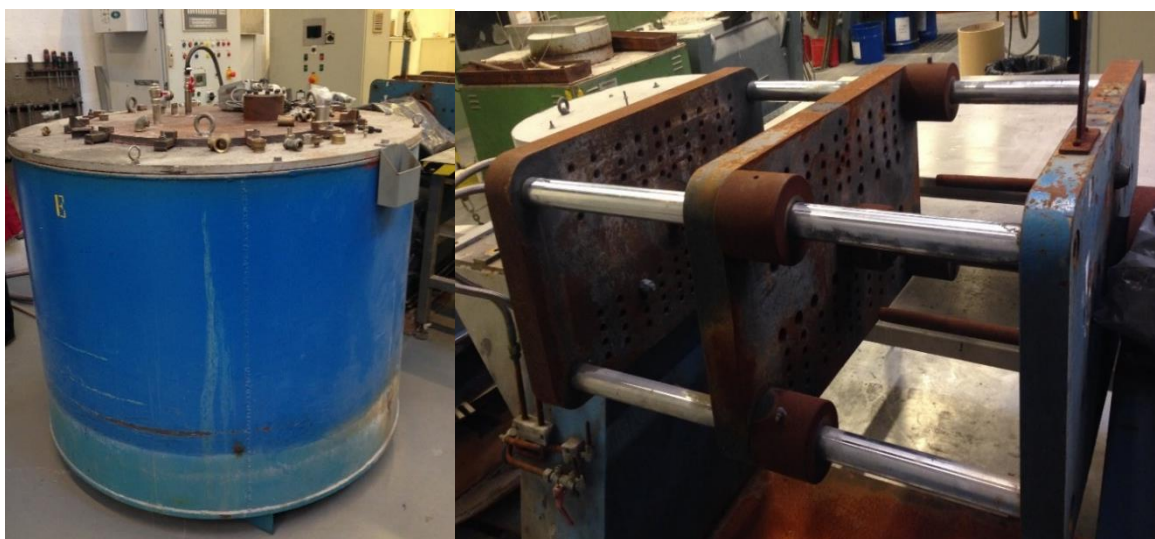


Figura 69: Forno de resistência elétrica existente nas instalações do INEGI para adaptação da coquilhadora no seu topo (à esquerda), e coquilhadora (à direita).

Ao longo do desenvolvimento do conceito de funcionamento da estrutura, e para permitir o movimento vertical da coquilhadora, foram geradas 2 soluções construtivas distintas:

- Sistema de elevação através de um mecanismo do tipo came;
- Utilização de um sistema de elevação por atuação hidráulica.

Ambos os conceitos gerados baseiam-se numa estrutura com o mesmo tipo de fixação da coquilhadora à estrutura, mas com mecanismos de movimentação vertical em relação ao forno distintos.

Devido a não haver possibilidade de "enterrar" o forno na unidade fabril da STA, que permitiria reduzir a altura total da estrutura, partiu-se para a idealização de uma estrutura em altura, que permite a utilização do forno tal como é apresentado na Figura 69, ou seja, à superfície. Embora com prejuízo para a altura total necessária, esta solução apresenta-se válida.

O primeiro conceito gerado consiste na fixação da coquilhadora a uma placa móvel, sendo que o movimento vertical da última é realizado através do acionamento de um sistema do tipo came, esquematicamente representado na Figura 70. O princípio de funcionamento consiste na transmissão de um movimento de rotação num movimento linear.

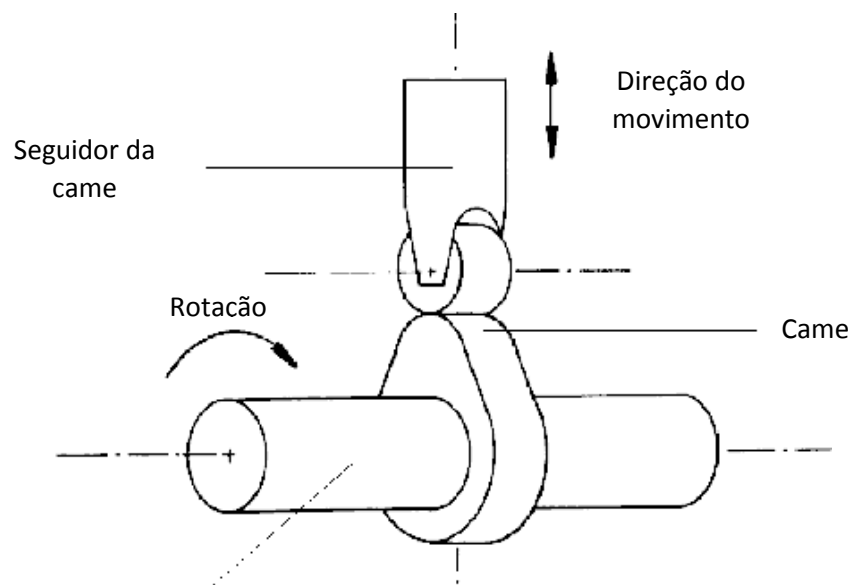


Figura 70: Sistema de transmissão de movimento do tipo came (Rintala 1996).

Deste modo, a rotação das cames permitirá um movimento linear vertical de uma placa móvel, à qual a coquilhadora está fixa. A rotação das cames é desencadeada através do acionamento de dois veios colocados nas laterais da estrutura. Embora esta solução seja de baixa complexidade e relativamente barata, abandonou-se este conceito devido a existir uma elevada dependência entre o peso total a suportar e o correto funcionamento do mecanismo de elevação, assim como uma maior limitação a nível do curso total entre a posição descida e subida.

Embora o conceito tenha sido abandonado, a modelação 3D da solução desenvolvida encontra-se apresentada na Figura 71. A Figura 72 contém uma vista pormenorizada da zona marcada a vermelho (com a letra "A") na Figura 71.

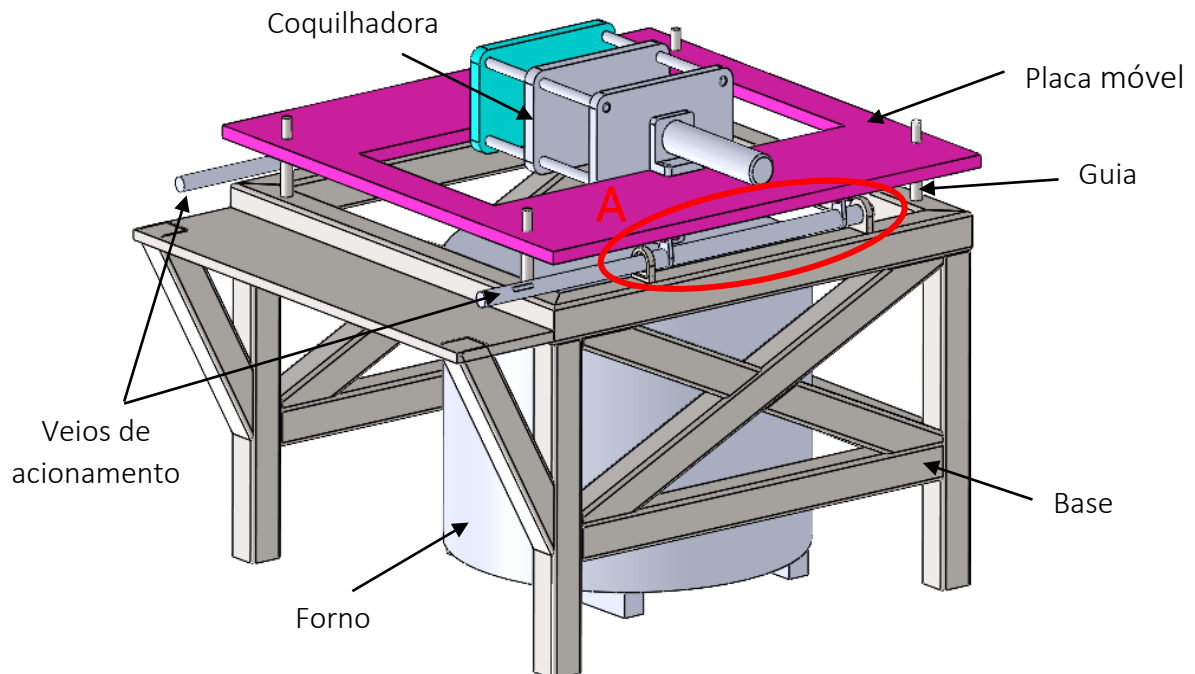


Figura 71: Vista global da modelação 3D do primeiro conceito gerado: sistema de elevação através de um sistema do tipo came.

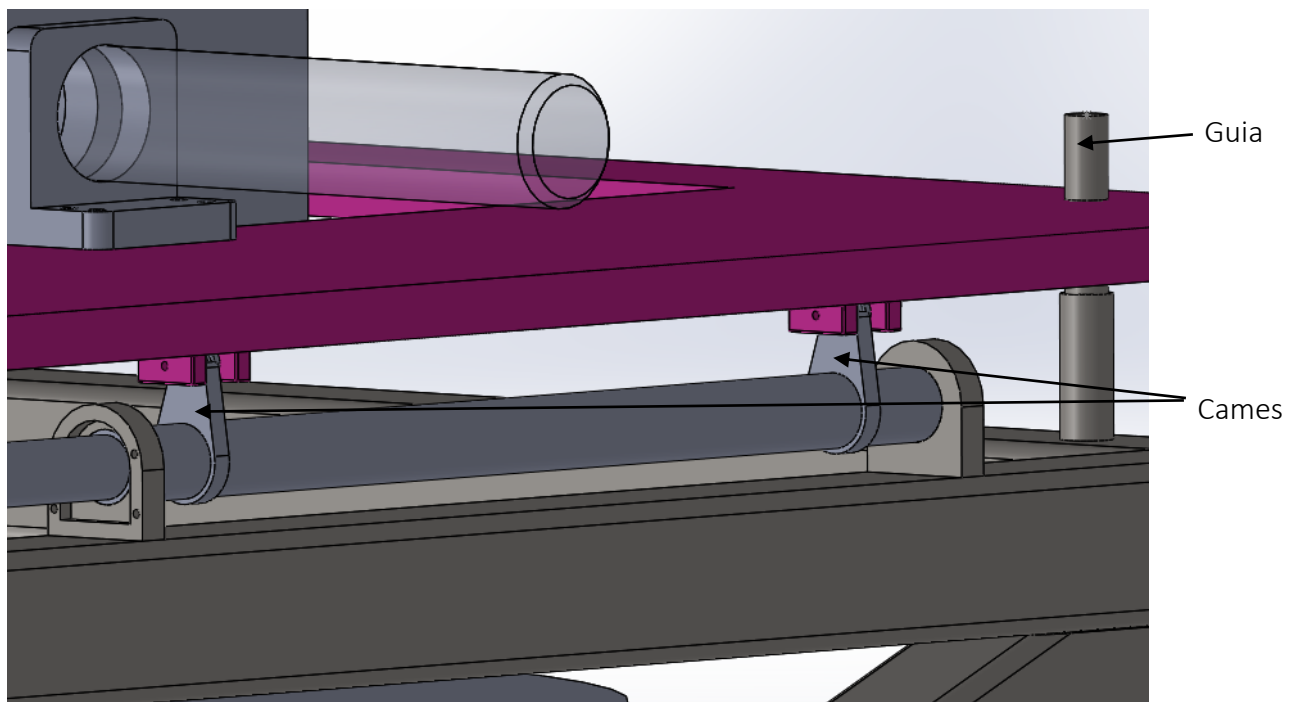


Figura 72: Modelação 3D do primeiro conceito gerado: vista pormenorizada da came.

O segundo conceito gerado consiste na criação de uma estrutura que permite a movimentação da coquilha/coquilhadora através da ação de um atuador hidráulico, fixo ao topo da estrutura. Esta solução, embora mais dispendiosa, permite um controlo mais preciso do movimento vertical, com uma menor dependência do peso do conjunto e com a capacidade de gerar maiores cursos. É de salientar que a movimentação da coquilhadora através de uma atuação hidráulica fixa ao topo da estrutura, é a solução construtiva mais utilizada pelos construtores de equipamentos de FCBP, tal como é possível identificar nas duas unidades apresentadas na Figura 73.

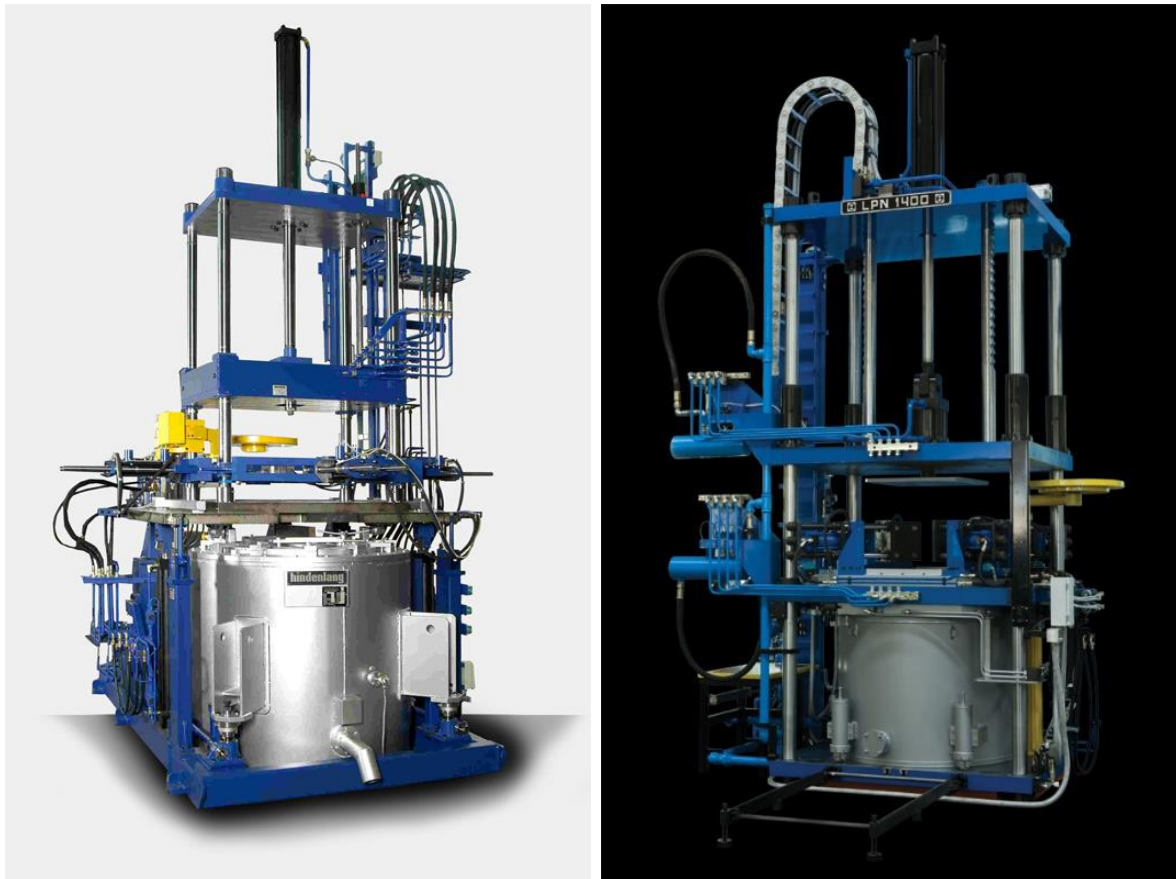


Figura 73: Dois exemplos de unidades de FCBP com atuação hidráulica no topo (LEAMPE 2014; C.P.C. Group 2014).

É importante destacar a elevada importância que o *benchmarking* possui no desenvolvimento de qualquer projeto de engenharia, não só na ida ao encontro de uma solução construtiva preferencial, mas na complementaridade que diversos conceitos, favorecendo a geração de produtos com melhor qualidade e funcionalidade. Deste modo, a análise de diferentes unidades de FCBP, de diferentes fabricantes, teve um importante papel neste projeto.

3.3.1 Modelação 3D do conceito e o seu princípio de funcionamento

Apresenta-se na Figura 74 uma vista global da modelação 3D do conceito da estrutura desenvolvida em SolidWorks, com a respetiva designação dos diversos componentes e algumas cotas de atravancamento. Será também realizada a descrição do funcionamento da máquina.

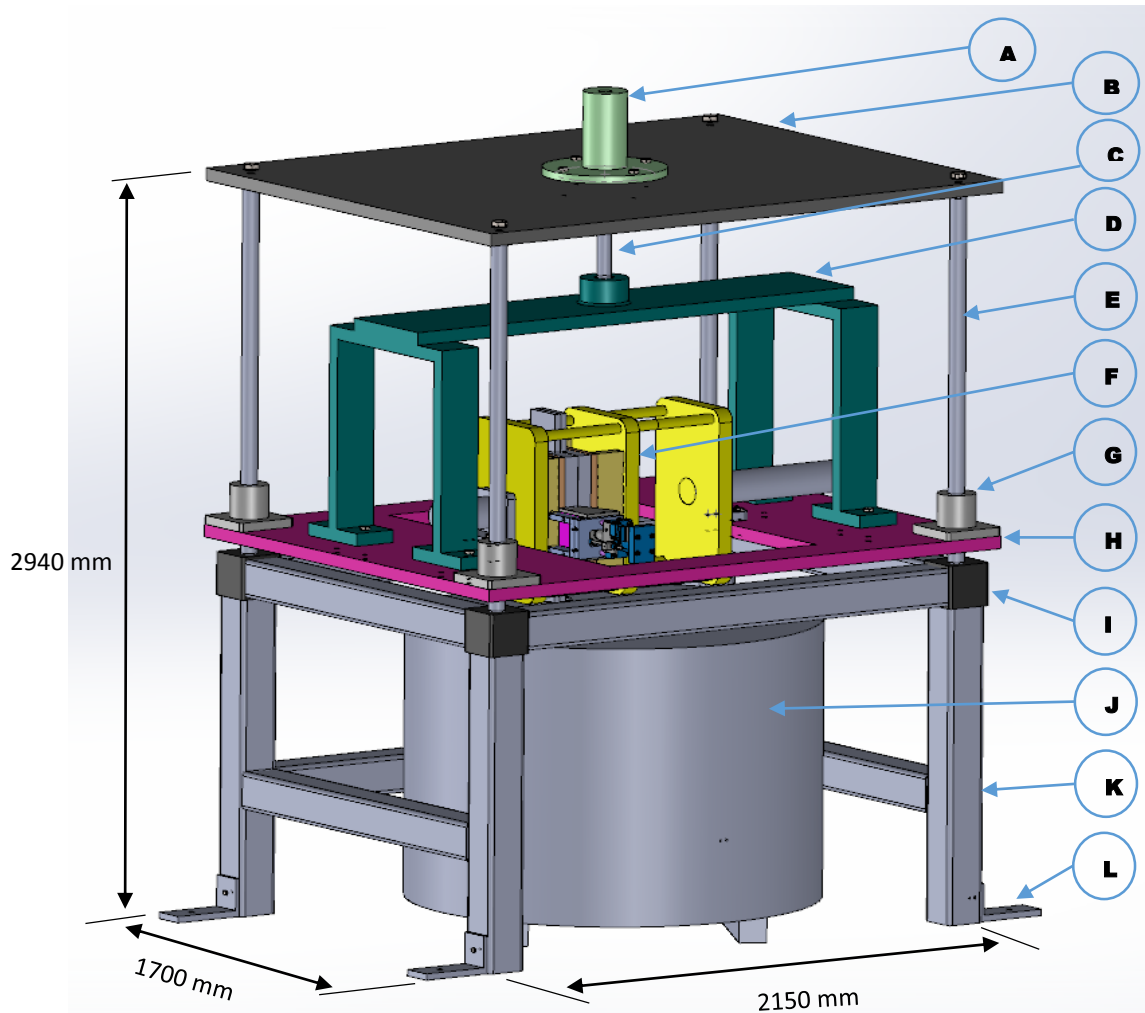


Figura 74: Vista geral da modelação 3D realizada em SolidWorks.

Lista simplificada dos componentes:

- A: Cilindro hidráulico;
- B/H: placa de topo/placa móvel - 2230 x 1780 x 50 mm (L x M x e);
- C: Haste do cilindro $\varnothing 50$ x 600 mm.
- D: Braço de elevação da placa móvel;
- E: 4 Guias lineares $\varnothing 60$ x 1550 mm (\varnothing x L);
- F: Coquilhadora;
- G: 4 Chumaceiras lineares com flange;
- I: 4 Blocos de fixação das guias lineares;

- J: Forno elétrico;
- K: Base de suporte: perfil soldado 150 x 150 x 8 mm (L x M x e);
- L: 4 Satapas de fixação;

A solução gerada consiste numa adaptação do tipo de solução construtiva típica das máquinas de FCBP, apresentadas na Figura 73. A estrutura permite dois movimentos distintos:

- Movimento vertical orientado da coquilhadora: desencadeado através da atuação do cilindro hidráulico, fixo à placa de topo da estrutura. Os movimentos de descida e subida da coquilhadora permitem o encosto da coquilhadora no topo do forno assim como o desencosto e a subida da coquilhadora, nas fases de enchimento e remoção dos fundidos, respetivamente. Quando a coquilhadora se encontra na posição máxima superior (para remoção das peças), a distância entre o bico do forno e o inserto definiu-se com o valor de 300 mm;
- Movimento de abertura e fecho da coquilha: após o enchimento, e depois da subida da coquilhadora, é aberta a coquilha para remoção dos fundidos. Após o arrefecimento da coquilha e eventual aplicação do *die coating*, a coquilha é fechada e procede-se ao movimento de descida. O movimento de abertura e fecho da coquilha é realizado segundo o princípio de funcionamento típico de uma coquilhadora, ou seja, através de uma atuação hidráulica no prato móvel.

As duas posições extremas da coquilhadora e encontram-se representados na Figura 75.

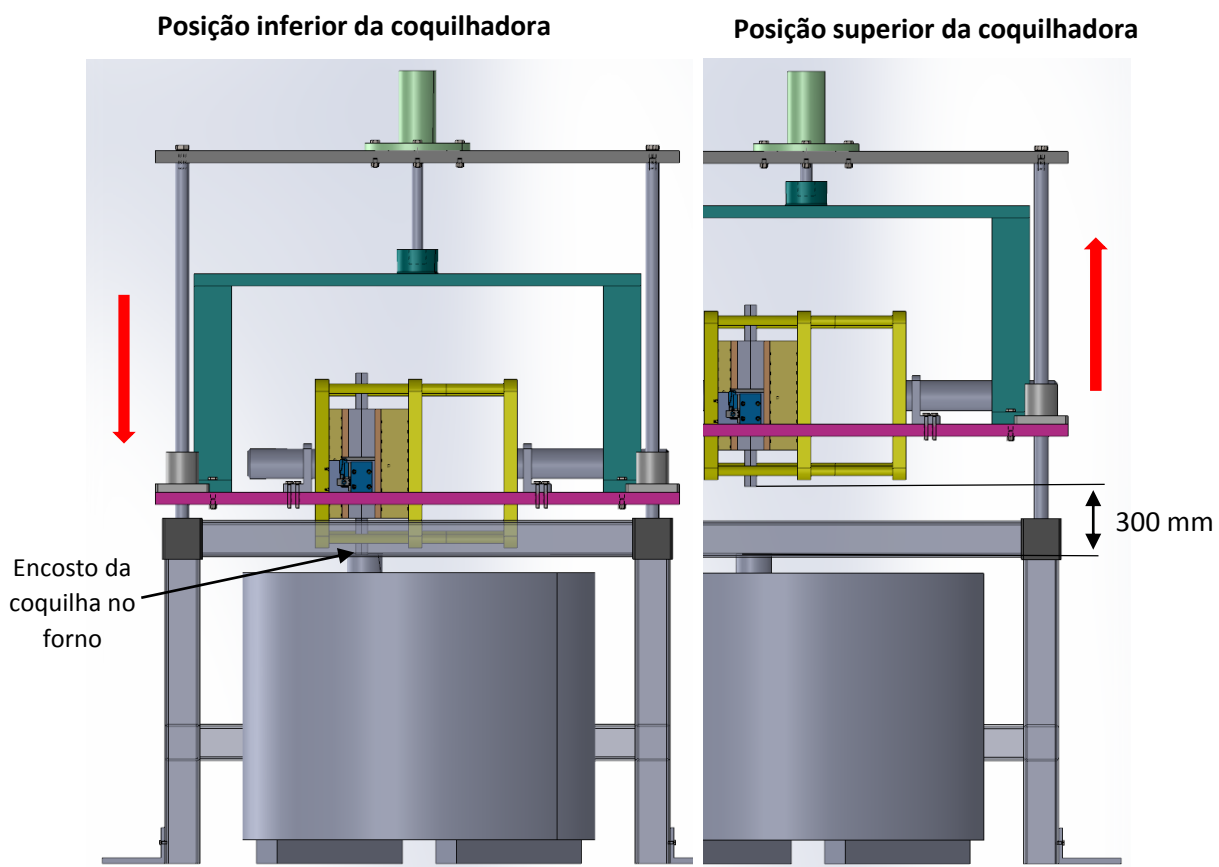


Figura 75: Movimento de descida e subida da coquilhadora (modelação em SolidWorks).

Na Figura 76 está representado o movimento de abertura e fecho da coquilha.

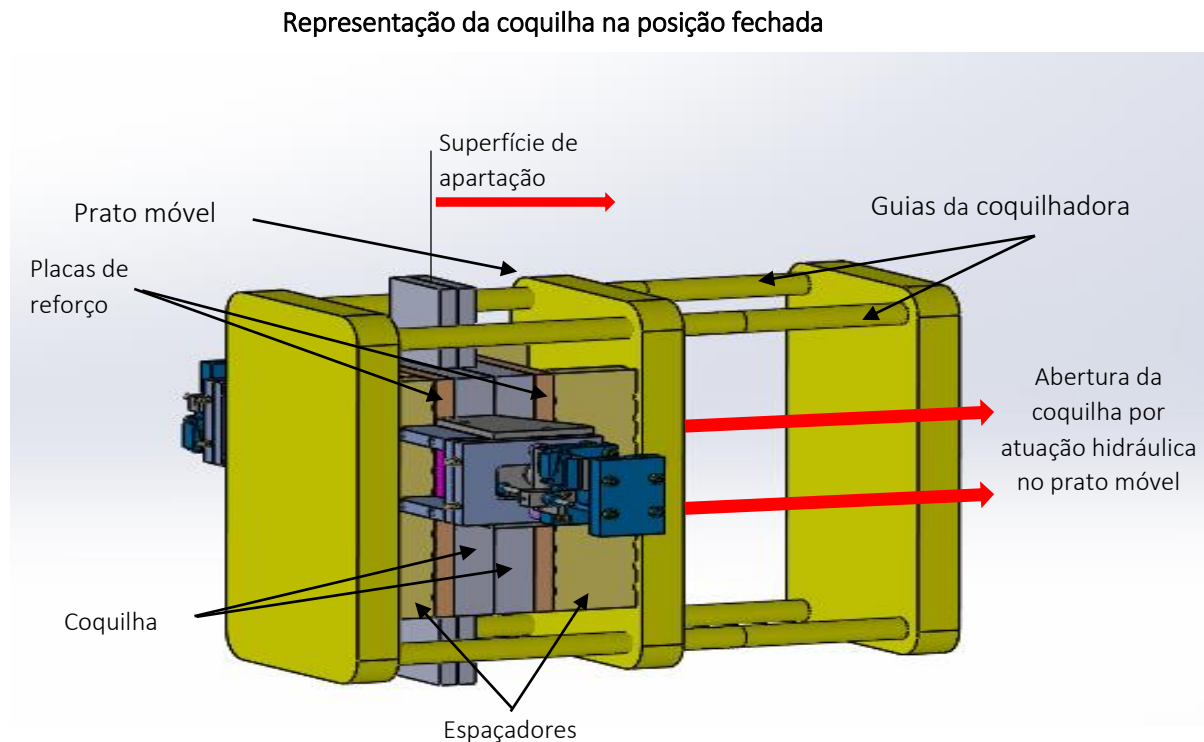


Figura 76: Abertura e fecho da coquilha através do movimento do prato móvel (modelação em SolidWorks).

Após a definição dos mecanismos de movimentação vertical da coquilhadora e fecho/abertura da coquilha, o passo seguinte reside na criação de uma estrutura que, em primeira instância, suporte o cilindro hidráulico (que exerce a força necessária à elevação da coquilhadora) e permita a fixação e guiamento apropriado da placa móvel da máquina (à qual está fixa a coquilhadora).

Para suportar toda a estrutura superior foi criada uma base de elevada rigidez. Deste modo, foi modelada uma base constituída por uma estrutura soldada de perfil quadrado (150x150x8 mm). A base foi gerada com a altura necessária de modo a garantir a cota vertical compatível com o posicionamento da coquilhadora no topo do forno, e inclui uma lateral “aberta” para permitir a movimentação da estrutura, condição necessária para o enchimento do forno. Soldados aos cantos superiores da base encontram-se 4 blocos de aço, que permitem a fixação das 4 guias da estrutura.

Na Figura 77 encontra-se representada a modelação 3D da base, realizada no SolidWorks, com as respetivas cotas de atravancamento e o perfil utilizado.

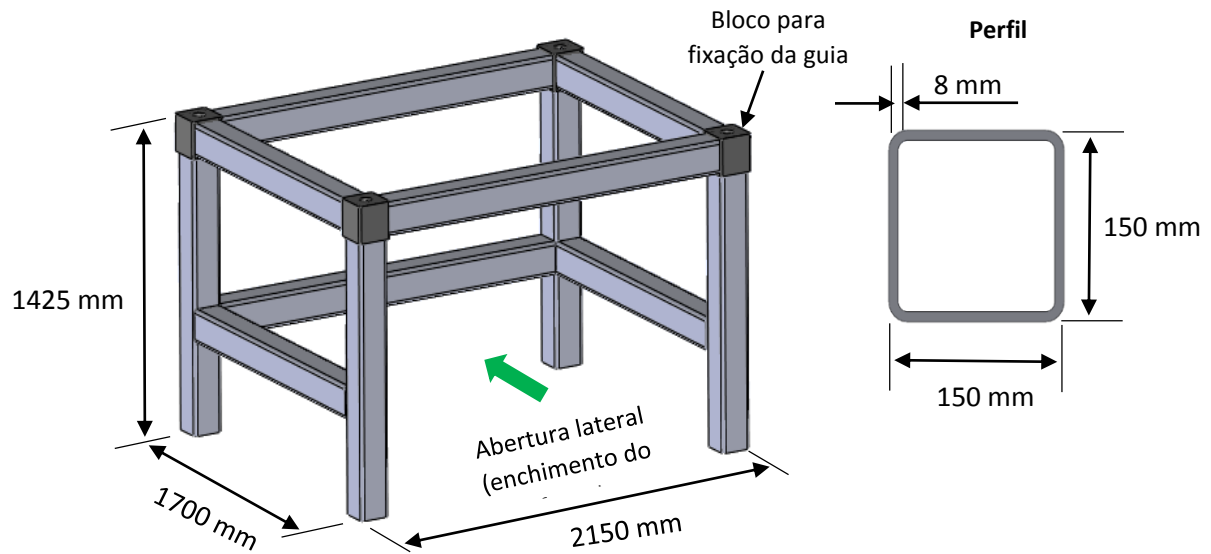


Figura 77: Modelação 3D da base de suporte em estrutura soldada: perfil de secção quadrado (150x150x8 mm).

As guias da estrutura, que se encontram fixas aos blocos anteriormente referidos, garantem o guiamento da placa móvel da máquina no movimento vertical. No topo da estrutura, e aparafusada ao topo das guias, encontra-se a placa de topo, que suporta o cilindro hidráulico.

Na Figura 78 encontra-se representada a modelação de todo o conjunto anteriormente referido (base + guias + placa de topo), com as respetivas cotas de atravancamento.

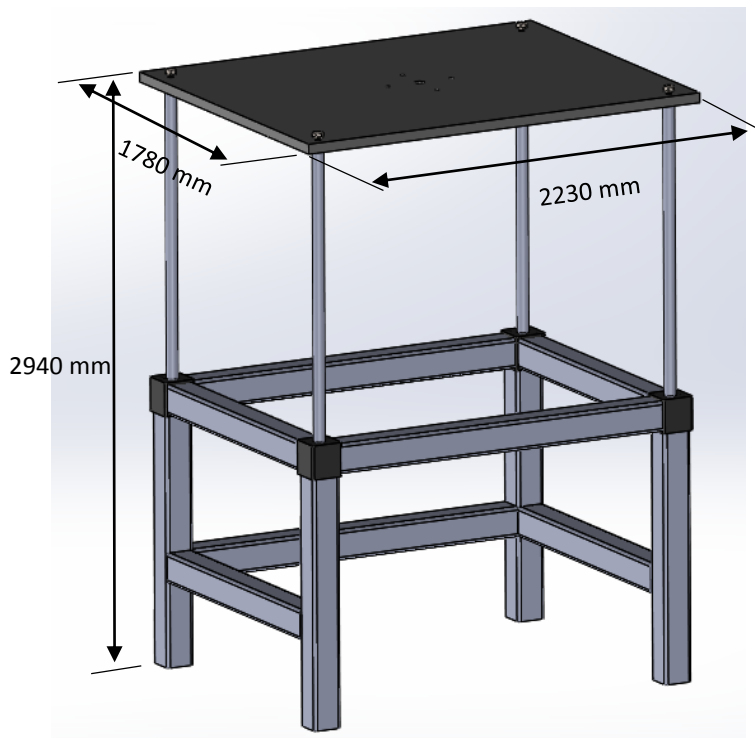


Figura 78: Conjunto: base + guias + placa de topo (modelação 3D em SolidWorks).

A placa móvel, na qual está fixa a coquilhadora, movimentar-se-á ao longo das guias representadas na Figura 78. O contacto entre a placa móvel e as guias da máquina é feito através de 4 chumaceiras lineares com flange. O movimento vertical da placa móvel da máquina, tal como anteriormente referido, é assegurado pela atuação do cilindro hidráulico. É importante salientar que a haste do cilindro hidráulico não atua diretamente na coquilhadora ou na placa móvel, estando fixa a um “braço de elevação” por intermédio de uma ligação roscada.

A placa móvel e todos os componentes que se movimentam solidariamente com esta encontram-se representados na Figura 79.

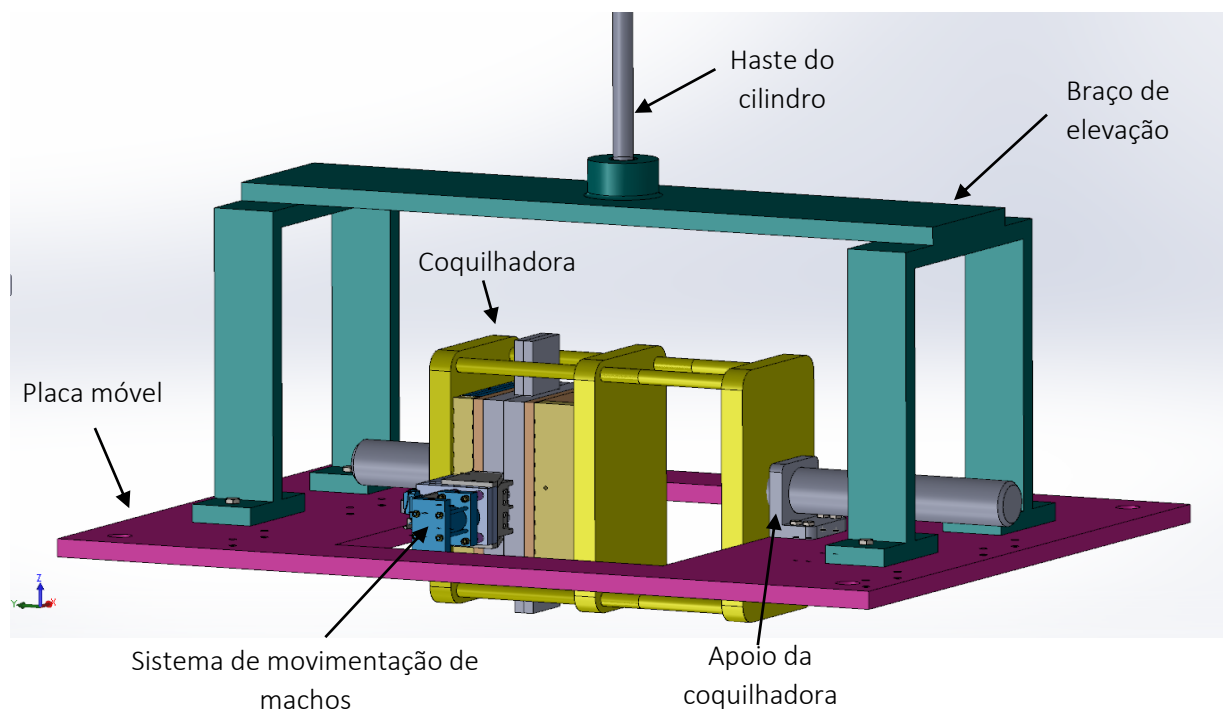


Figura 79: Componentes do conjunto interior com movimento solidário com a placa móvel

A configuração da placa móvel e do braço de elevação foram estabelecidas de modo a que a coquilhadora possa rodar sem que o sistema de movimentação de machos interfira com qualquer um dos anteriores componentes. Relativamente à placa móvel, foi criada uma “zona aberta” no centro da placa, de dimensões 1380x900 mm, que permite uma folga de 77,5 mm entre a placa móvel e as extremidades do sistema de movimentação de machos. Esta solução é apresentada na Figura 80.

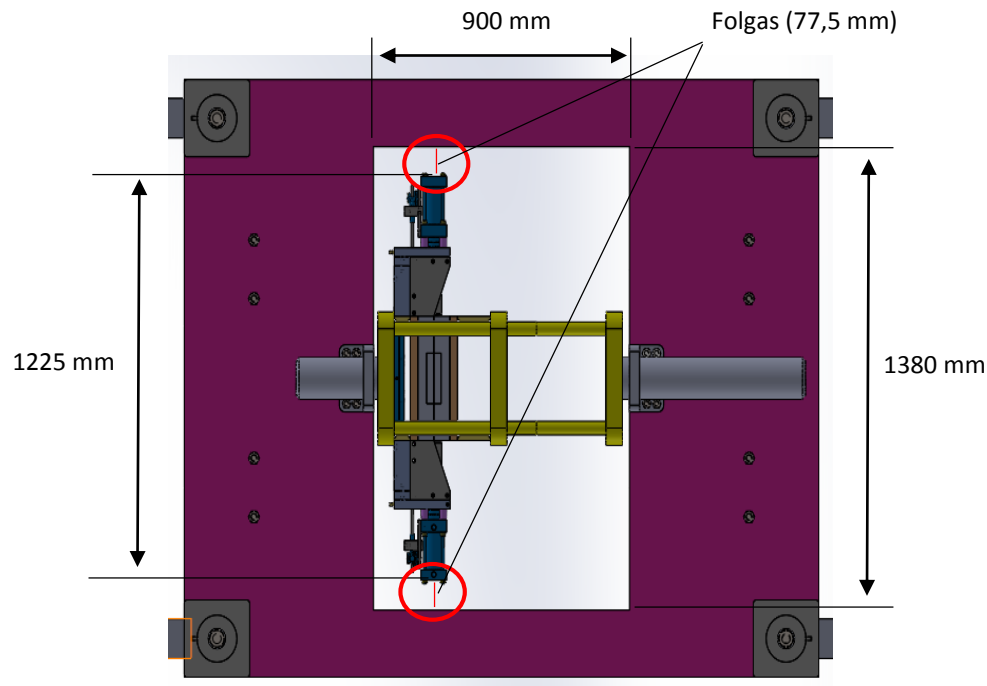


Figura 80: Abertura na zona central da placa móvel e respectivas folgas em relação ao sistema de movimentação dos machos.

Relativamente ao braço de elevação, foi garantido que este componente não gerasse um possível atravancamento à rotação da coquilhadora, através da especificação de uma folga considerável entre o último e o sistema de movimentação de machos. Esta consideração torna-se crítica devido a existir a possibilidade da coquilha poder trabalhar nas duas posições (normal e rodada em 180°), sendo que durante o movimento de rotação, o sistema de movimentação de machos não poderá embater no braço de elevação. É importante referir que aquando da rotação da coquilhadora, e devido ao atravancamento existente entre o sistema de movimentação e machos e o forno, esta etapa não poderá ser realizada com o forno no interior da estrutura.

A Figura 81 apresenta a folga existente entre o sistema de movimentação e machos e o braço de elevação da placa móvel.

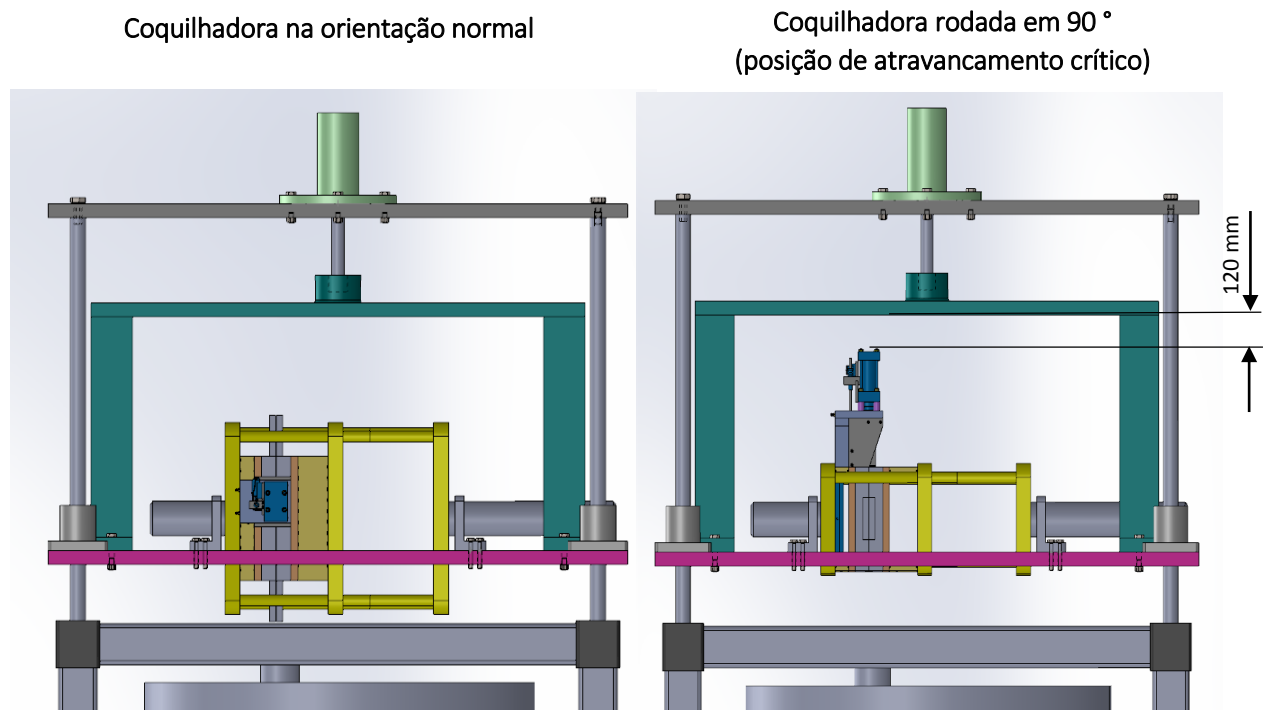


Figura 81: Folga entre o sistema de movimentação de machos e o braço de elevação da placa móvel.

Tal como é possível identificar na Figura 81, quando a coquilhadora está a realizar o movimento de rotação, e para o instante em que se encontra rodada em 90° (posição de atravancamento crítico), especificou-se uma folga de 120 mm entre o braço de elevação e a extremidade do sistema de movimentação de machos

3.3.2 Penosidade para o operador

É importante que a penosidade do trabalho executado pelo operador seja a mais baixa possível. Tendencialmente, e comparativamente a outros processos de fundição, como por exemplo a FCG, a FCBP está associada a um maior grau de automatização, permitindo dispensar a elevada exigência física que normalmente é imposta ao operador. Devido à remoção dos fundidos não ser realizada de modo automático, que permitiria dispensar o trabalho do operador nesta e eventualmente noutras tarefas, existe a necessidade de considerar no processo de idealização da estrutura, a penosidade associada ao trabalho realizado pelo operador da máquina. A base da estrutura, que inicialmente apresentava uma geometria quadrada de 2150x2150 mm, sofreu um encurtamento de 450 mm na direção da frente de trabalho do operador (2150x1700 mm), para permitir que a remoção dos fundidos seja realizada com menor dificuldade.

Tendo em conta que o comprimento médio do braço de um homem é aproximadamente 820 mm (NASA 2014), a distância horizontal que separa o centro geométrico da coquilha e o local onde o operador está posicionado, deverá aproximar-se desse valor para que a remoção dos fundidos não apresente dificuldade. Deste modo, quando o operador está próximo da máquina, numa posição equivalente à de remoção dos fundidos, a distância entre o operador e o centro da coquilha foi definida com o valor de 850 mm. Embora ligeiramente superior aos 820 mm anteriormente referidos, o valor de 850 mm não poderá ser encurtado devido ao espaço ocupado pelo sistema de movimentação de machos.

Além da cota horizontal anteriormente referida, existe também a necessidade de considerar a cota vertical, que o operário terá de alcançar para remover os fundidos. Esta cota é dada pela distância entre solo e o centro geométrico da coquilha. Quando a coquilhadora se encontra na “posição subida”, a distância entre o chão e o centro geométrico da coquilha é 1950 mm. Para um cidadão de estatura média, o valor médio da distância entre a palma dos pés e o respetivo ombro é aproximadamente 1500 mm (NASA 2014). Deste modo, o trabalhador terá bastante dificuldade em retirar o fundido, pela diferença de alturas entre o seu ombro e o centro da coquilha. Esta incompatibilidade encontra-se representada na Figura 82.

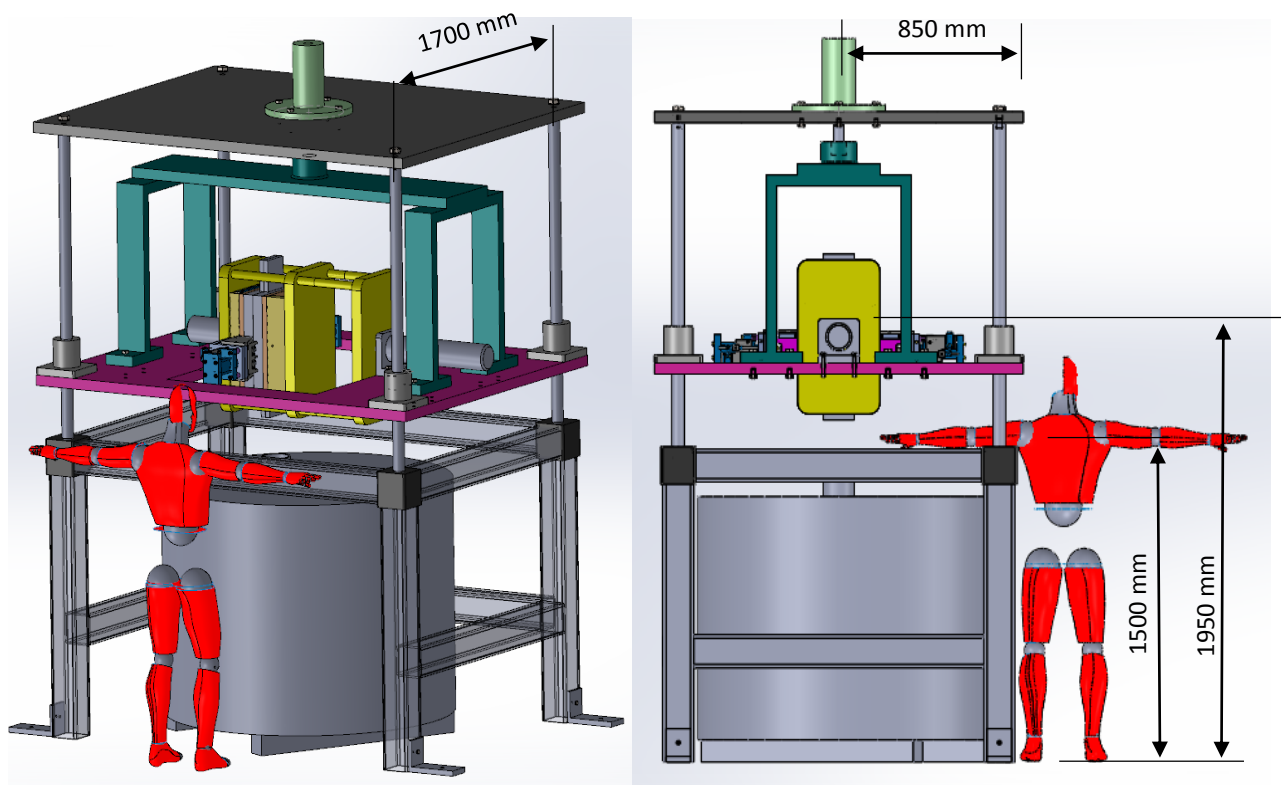


Figura 82: Relação entre as dimensões da estrutura e as dimensões de um homem de estatura média.

Devido à incompatibilidade apresentada, será necessário recorrer a uma solução que permita diminuir a discrepância entre a altura do braço do operador e a altura da coquilha. A solução gerada consiste na utilização de um estrado, elevado do chão em 400 mm. O estrado terá obviamente de ser de facilmente movimentado, devido à necessidade de encher o forno pela frente de trabalho do operador. Esta solução encontra-se apresentada na Figura 83.

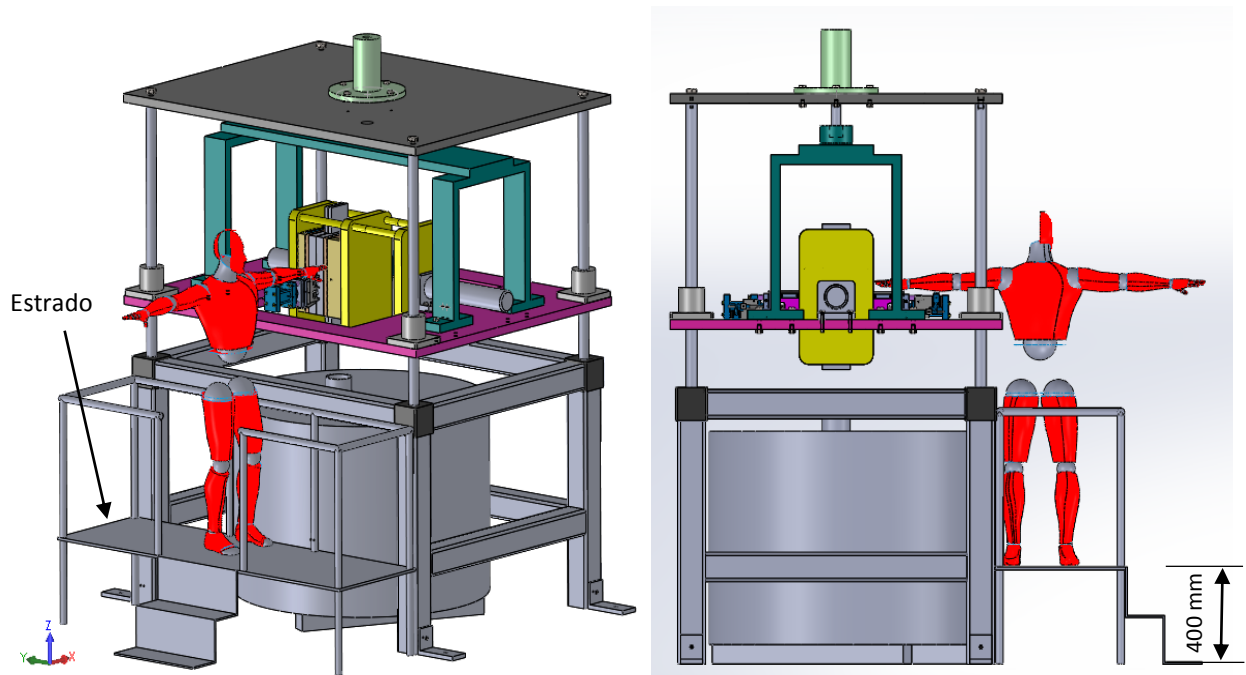


Figura 83: Inclusão de um estrado amovível para a redução da cota vertical entre o chão e a coquilha.

Devido ao encurtamento das cotas horizontal e vertical, através da alteração das dimensões da estrutura e através da colocação de um estrado, respetivamente, a solução apresentada permitirá minimizar a penosidade do trabalho realizado pelo operador. Idealmente, a utilização de um manipulador robótico poderá trazer algumas vantagens, nomeadamente a redução dos tempos de ciclo, a pré-inspeção ótica das peças (permitindo descartar mais cedo, eventuais peças defeituosas) e a mobilização do operador para outras tarefas.

Os desenhos 2D da estrutura global, do conjunto da coquilhadora, da placa móvel e do forno, poderão ser consultados nos Anexos A, B, C e D, respetivamente. É importante referir que para uma melhor visualização e interpretação dos desenhos 2D, não foi incluído o estrado amovível no desenho da estrutura global.

3.3.3 Simulação estrutural

Após a idealização da solução construtiva e a respetiva modelação 3D no *SolidWorks*, realizaram-se diversas simulações estruturais (no mesmo programa), permitindo a simulação do comportamento dos diversos componentes da estrutura quando sujeitos a cargas equivalentes às cargas reais. Estas simulações fornecem indicações claras do esforço a que os diversos componentes da estrutura estarão sujeitos, permitindo caso seja necessário, a alteração de algumas das geometrias, para minimização da tensão e/ou deformação gerados.

Para a realização das simulações estruturais em *SolidWorks* é importante o cumprimento dos diversos passos essenciais no *software*, de modo a serem obtidas simulações numéricas representativas do comportamento real da estrutura. Os passos mais importantes seguidos no *software*, assim como os parâmetros mais relevantes alvo de especificação são:

- 1) Indicação dos materiais correspondentes a cada componente da estrutura;
- 2) Estabelecimento das condições de fixação da estrutura;
- 3) Criação das condições de contacto entre componentes distintos (com ou sem movimento relativo);
- 4) Geração da malha tridimensional;
- 5) Aplicação de cargas equivalentes para uma representação simplificada da estrutura real;
- 6) Realização da simulação propriamente dita.

Relativamente às condições da fixação da estrutura, estabeleceu-se uma fixação do tipo encastramento para os quatro pilares da base inferior, visto que é a condição fronteira que mais se assemelha à situação real de trabalho (quando a estrutura se encontra fixa ao solo). Este tipo de fixação encontra-se representado, a cor verde, na Figura 84.

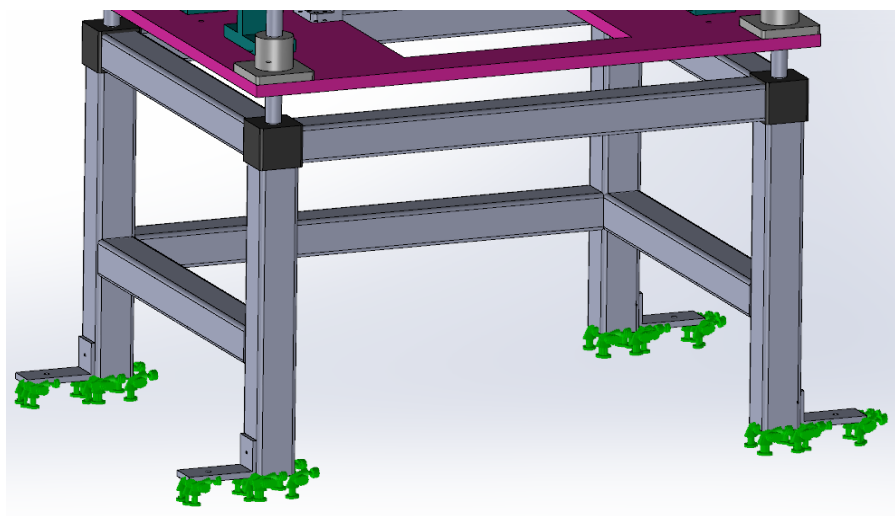


Figura 84: Representação das condições de fixação exterior da estrutura, estabelecidas no SolidWorks 2013.

As condições de contacto estabelecidas entre componentes foram de dois tipos:

- 7) “*no penetration*”(sem penetração): qualquer superfície em contacto direto com outra, e com movimento relativo entre ambas. Como exemplo, este tipo de condição foi estabelecida para o contacto entre a placa móvel da estrutura e as guias.
- 8) “*bonded*”(ligada): contacto rígido entre componentes, quer por ligações aparafusadas, quer por soldadura ou outro tipo fixação sem movimento relativo.

Relativamente à malha tridimensional estabelecida, optou-se por uma malha *standard*, com utilização do grau mais fino existente no software. Naturalmente, quanto mais fina é a malha criada, maior número de elementos esta terá e maior será o tempo de simulação, embora com melhores resultados. Na Figura 85 apresentam-se aos parâmetros da malha utilizados, e na Figura 86 encontra-se representada estrutura final já com a malha gerada.

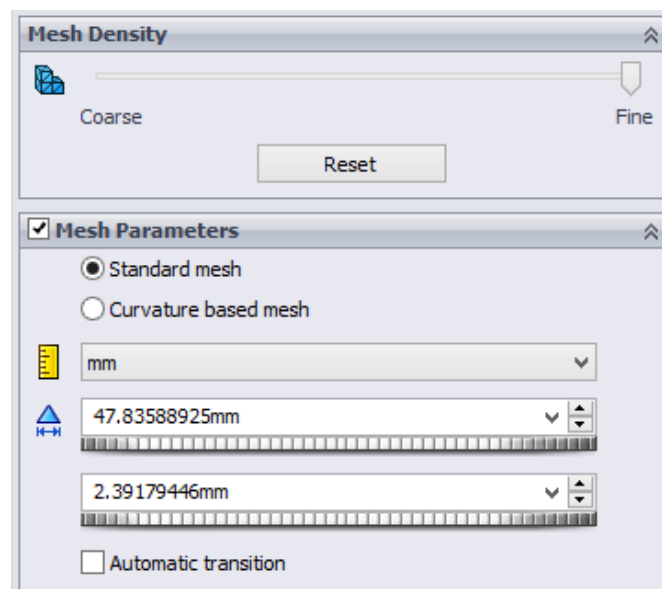


Figura 85: Parâmetros da malha gerada no SolidWords 2013.

O passo seguinte consiste na aplicação das cargas equivalentes. Nesta fase, recorreu-se à aplicação de duas forças idênticas nos apoios da coquilhadora (chumaceiras), forças estas que perfazem um total de 9800 N (≈ 1000 kg). Este valor estabelecido no *software*, é a resultante aproximada do peso da coquilhadora e de todos os componentes que estão fixos a esta. A coquilha, os calços da coquilha, o sistema de movimentação dos machos, e outros, constituem alguns exemplos. Na simulação estrutural, o tempo total de simulação aumenta exponencialmente com o aumento do número de componentes da estrutura. Deste modo, optou-se por remover os componentes anteriormente referidos da simulação (substituindo-os por duas forças equivalentes) por uma questão de simplificação da estrutura a simular. As duas forças equivalentes encontram-se representadas, a roxo, na Figura 86.

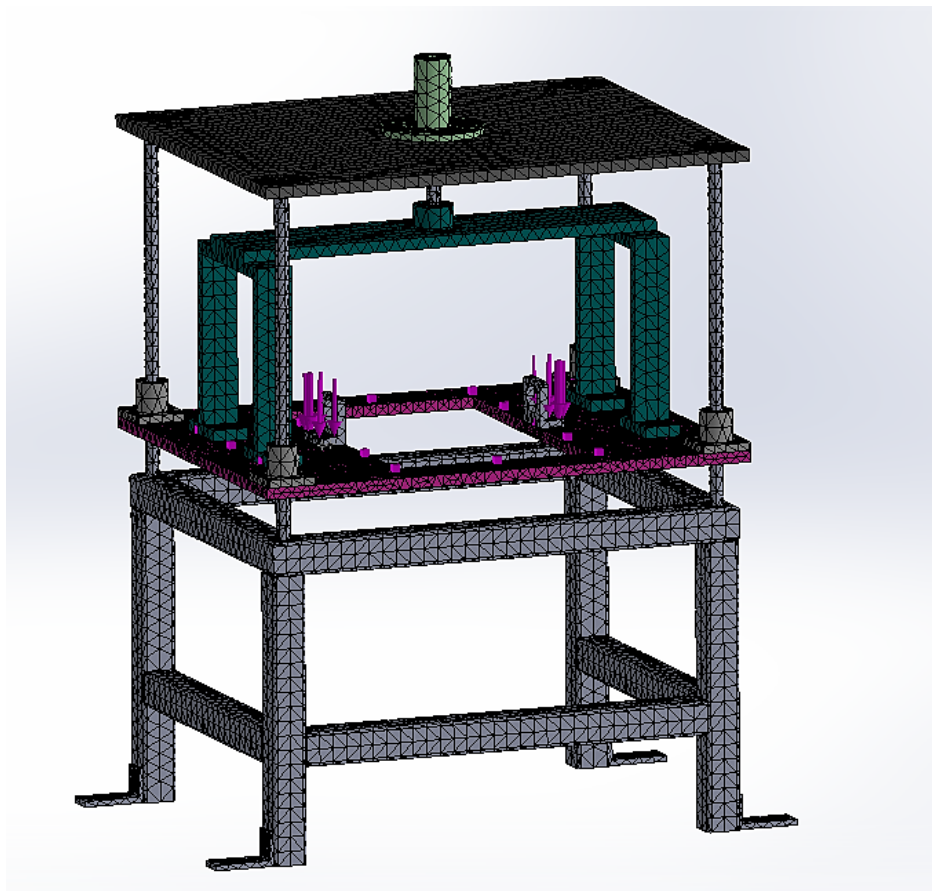


Figura 86: Representação da estrutura final depois de gerada a malha tridimensional, com aplicação de duas cargas equivalentes (a roxo).

Após a definição dos parâmetros mais importantes que constituem alvo de especificação no *software*, realizou-se a simulação estrutural propriamente dita. Através da simulação obtiveram-se os dados relativos ao valor da tensão e deformação nos diversos componentes da estrutura. Foi realizado um processo iterativo, onde foram sendo corrigidas algumas das espessuras e geometrias envolvidas, nomeadamente a espessura das placas, a espessura e

geometria do braço de elevação da placa móvel, assim como o diâmetro das guias, até serem obtidos valores de tensão e deformação admissíveis.

Essencialmente, devido à utilização de aço na maioria dos componentes da estrutura, e sendo o valor da carga aplicada relativamente baixo, o valor da tensão máxima registrada está claramente abaixo da tensão limite de elasticidade do aço utilizado nos componentes da simulação (≈ 620 MPa). Ao longo desta secção serão apresentados os registos da última simulação estrutural realizada no SolidWorks, sendo dada especial atenção às zonas onde os esforços se revelam mais elevados. A Figura 87 apresenta a vista geral da distribuição de tensões na parte superior da estrutura, que permite verificar o valor máximo da tensão de von Mises registrada (29,3 MPa). Na Figura 87 estão ainda destacadas as três zonas que registam a tensão mais elevada em toda a estrutura: contacto entre a placa móvel da estrutura e as guias (zona "A"), contacto entre as guias e a base da estrutura (zona "B") e no contacto entre a haste roscada do cilindro e o braço de elevação (zona "C"). Para cada um dos três locais referidos, existe um "ponto de prova" da tensão registrada.

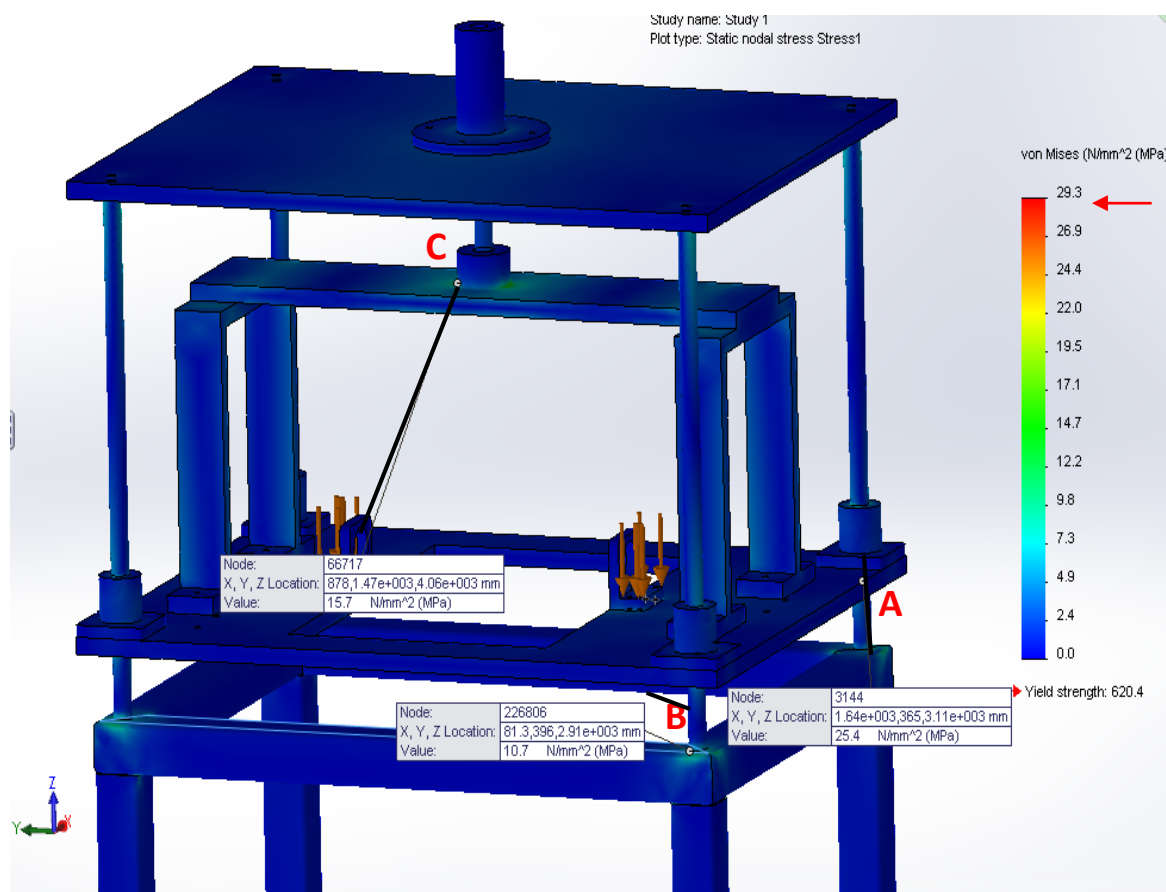


Figura 87: Vista global da distribuição de tensões na parte superior da estrutura, com as três zonas que registam a tensão mais elevada ("A", "B" e "C").

Relativamente à deformação resultante da estrutura, o máximo valor registado é relativamente baixo e igual 0,6 mm, dado para as zonas onde se situam os apoios da coquilhadora. O campo de deformações da estrutura encontra-se apresentado na Figura 88.

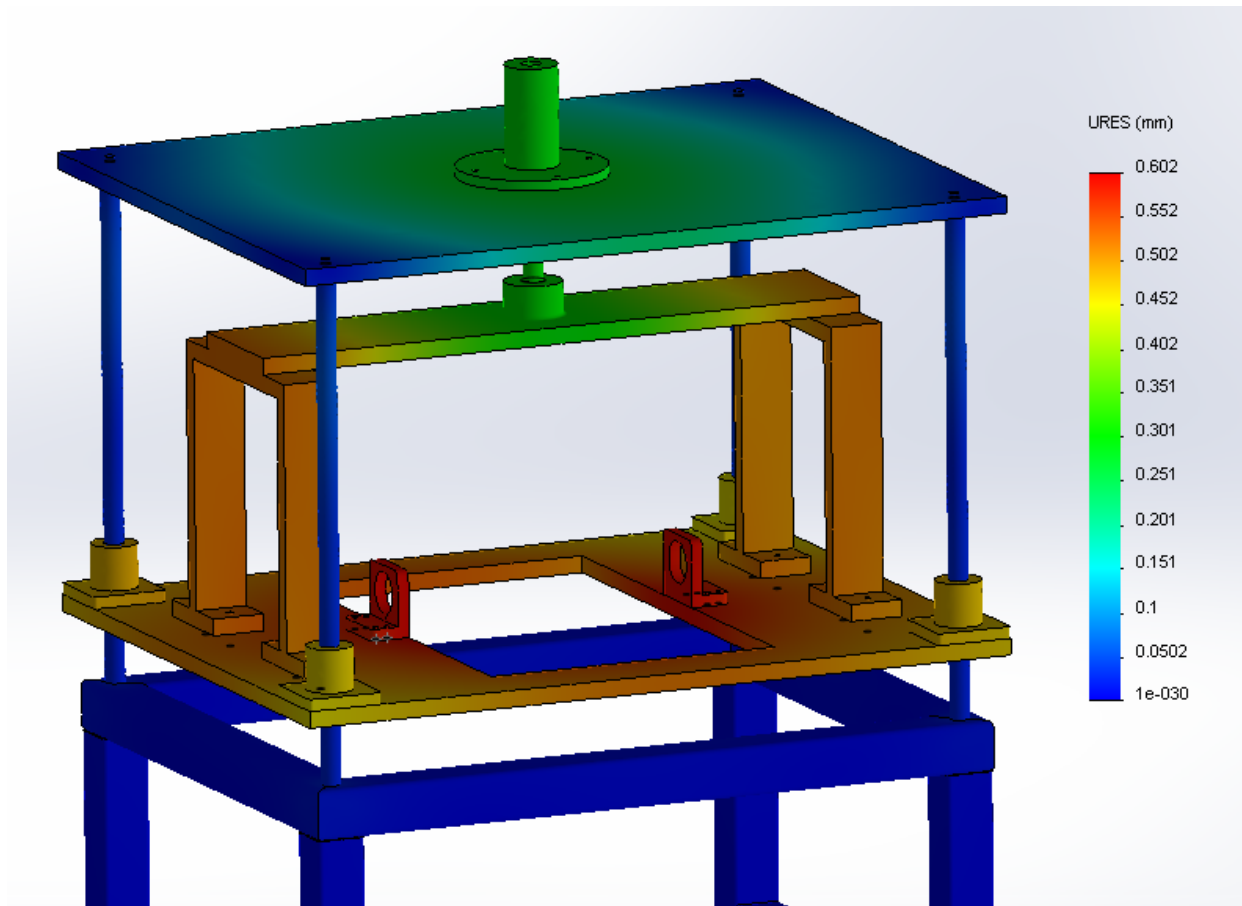


Figura 88: Vista global do campo de deformações da estrutura.

Enviou-se um pedido de orçamento da estrutura idealizada, sendo que o preço para a sua construção se situa entre 15000 e 20000€. Incluindo o valor do forno e da coquilhadora, o preço total do conjunto rondará os 50000€, valor bastante inferior ao custo médio de uma unidade de FCBP tipicamente comercializada no mercado, onde o seu custo se situa entre 200000 e 300000€.

4. Conclusão e Sugestão de Trabalhos Futuros

4.1 Conclusão

O trabalho desenvolvido no decorrer da realização deste projeto foi de extrema importância porque possibilitou a aquisição de novos conhecimentos e permitiu uma maior consciencialização para os problemas reais do dia-a-dia de um engenheiro, permitindo a aprendizagem da forma como lidar com eventuais dilemas e o modo de encontrar novas soluções para a sua resolução.

Através da realização da referida dissertação, e sobre a temática em estudo, foi possível tirar diversas conclusões, que serão em seguida descritas:

- 1) É possível concluir que o processo de FCBP para o vazamento ligas de alumínio é mais do que uma alternativa aos demais processos de fundição, constituindo sem margem para dúvida um processo de excelência, para a obtenção de peças com uma elevada integridade estrutural, *near net shape* e com bom acabamento. Caso o processo esteja automatizado, e depois da sua otimização, facilmente é possível manter a reprodutibilidade das características das peças. Embora os custos associados à aquisição desta tecnologia sejam relativamente onerosos, a minimização do número de defeitos, a diminuta taxa de rejeição das peças, o elevado rendimento global e a obtenção de peças de elevada integridade, poderá garantir a amortização do investimento a curto/médio prazo;
- 2) A simulação numérica de solidificação e enchimento é um processo moroso, técnico, de elevada complexidade, exigindo uma elevada formação por parte do utilizador para que sejam obtidos resultados que reproduzam de forma fiel o fenómeno real. Para isso, as propriedades características da liga a vazar e da moldação, assim como os parâmetros mais relevantes do processo em causa, deverão ser especificados com o maior detalhe possível. O ProCAST, embora não apresente resultados com uma fiabilidade de 100%, é sem qualquer dúvida uma ferramenta de apoio à fundição de extrema utilidade, e com a qual é possível uma melhor e mais rápida otimização dos processos de fundição comparativamente aos processos tradicionais de tentativa erro;
- 3) As soluções encontradas para os *layouts* do sistema de alimentação, em termos de simulação, cumprem os requisitos garantindo a obtenção de peças sem rechupes de dimensão revelante ou com localização em zonas superficiais. O sistema de enchimento é flexível, permitindo garantir a quase ausência de turbulência, especialmente para a orientação rodada em 180° da ferramenta. Na referida posição da coquilha, embora a turbulência seja minorada, a alimentação das peças é menos eficiente. Deste modo, as experiências de teste da ferramenta a trabalhar nas duas

orientações possíveis, revelar-se-ão preponderantes para a escolha de uma solução de compromisso;

- 4) Os rendimentos dos sistemas de gitagem e alimentação simulados encontram-se abaixo dos valores típicos na FCBP. No entanto, o rendimento poderá ser aumentado através do reaproveitamento de parte do metal do gito de enchimento, tendo para isso de ser alargado o seu diâmetro. A simulação numérica em ProCAST não permite simular as condições de retorno do metal para o forno, sendo por isso necessário otimizar o valor do diâmetro do gito aquando dos primeiros vazamentos;
- 5) O projeto da estrutura para montar a coquilhadora no forno cumpre as exigências estabelecidas, inserindo-se no conceito existente na grande maioria das unidades de FCBP já disponibilizadas no mercado.

4.2 Trabalhos Futuros

Existem diversos trabalhos futuros que poderão e deverão ser realizados no contexto da atual dissertação. Em seguida, encontram-se enumerados alguns desses trabalhos:

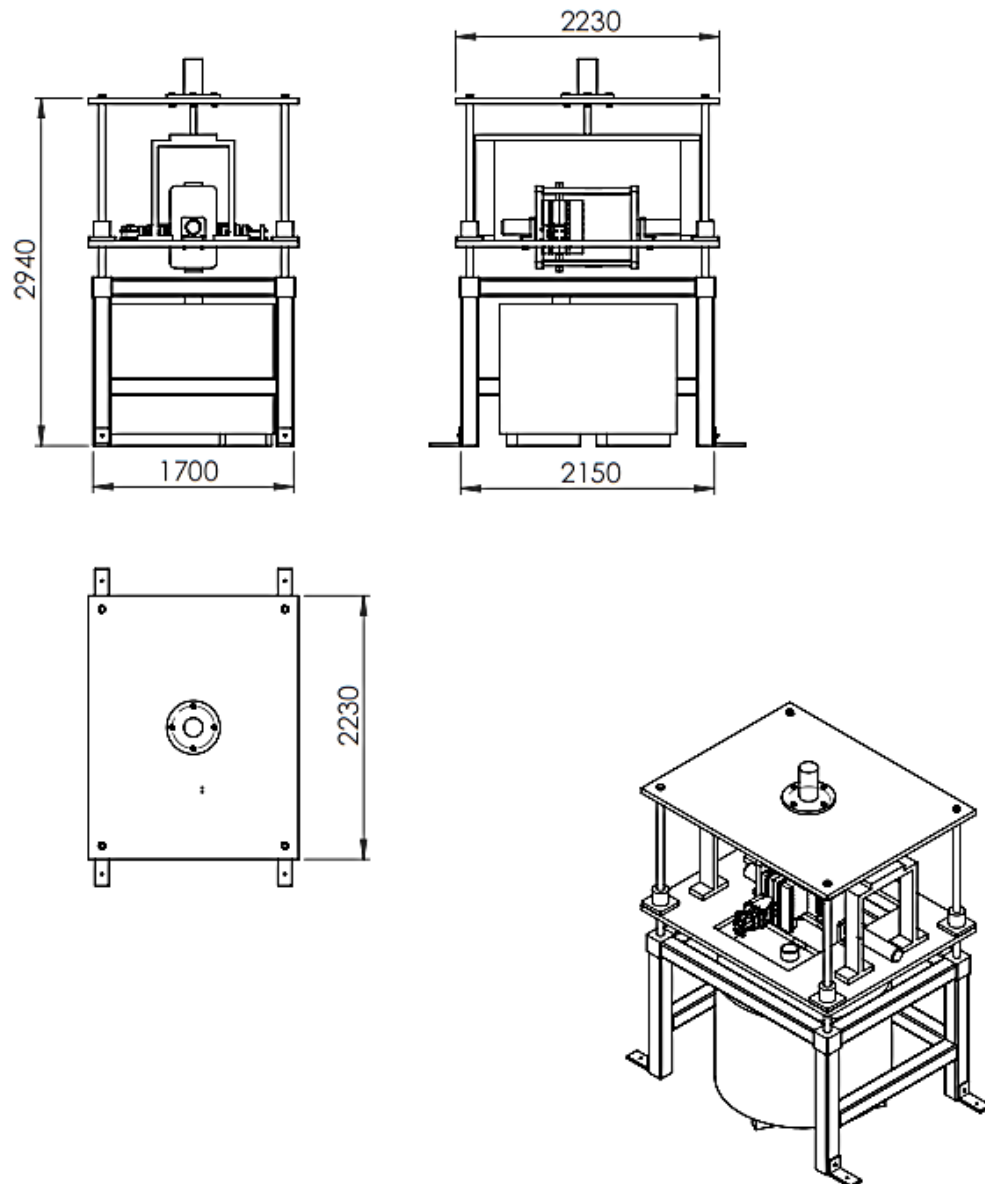
- Fabrico da coquilha e estrutura de adaptação da coquilhadora ao forno para realização dos primeiros vazamentos dos puxadores por FCBP;
- Análise das peças vazadas, comparando os resultados obtidos experimentalmente com os obtidos na simulação numérica: validação da eficácia do ProCAST na previsão de defeitos na FCBP e eventual comparação com resultados de outros *softwares*;
- Analogia entre a qualidade dos puxadores obtidos pelo processo desenvolvido (FCBP) e os obtidos por outros processos de fundição em moldações permanentes, atualmente utilizados na STA: FI, FCR e FCG. Validação experimental da grande potencialidade da FCBP para a produção de peças em ligas de alumínio;
- Comparação da qualidade final dos puxadores obtidos com a coquilha a trabalhar na orientação original, com aqueles obtidos a partir do funcionamento da ferramenta na orientação rodada em 180°;
- Otimização do processo, nomeadamente a parametrização de uma curva de enchimento (relação Pressão-tempo) para a fundição dos puxadores;
- Estudo da aplicabilidade da FCBP para o vazamento de outros tipos de ligas e para a fundição de outras peças.

Bibliografia

- Adeoye, Bolaji Aremo; Mosobalaje O. 2011. *Aluminium Countergravity - Potentials and Challenges*. Nigéria: Obafemi Awolowo University.
- "Alumínio". 2014. Acedido a 19/02/2014. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Alum%C3%ADnio>.
- Araújo, Tiago 2012. *Controlo estatístico do processo de anodização, na Empresa STA - Sociedade Transformadora de Alumínios, SA*. Porto: FEUP.
- ASM International. 1998. *Casting*. Vol. 4, ASM Handbook: ASM International.
- Botter, F. Bonollo; J. Urban; M. 2005. *Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: a technical and economical benchmark*. Italy: University of Padova.
- Brace, Arthur William e P. G. Sheasby. 1960. *The Technology of anodizing aluminium*. Stonehouse: Technicopy Limited.
- Brown, John R. 1999. *Foseco non-ferrous foundryman's handbook*. Vol. 11. Oxford, England: Butterworth Heinemann.
- Butler, W.A. 2001. *Die Casting (Permanent Mold)*. Elsevier Science Ltd.
- C.P.C. Group. 2014. "LPN MONEYMAKER". Acedido a 08/04/2014. <http://cpcmachines.ilindenmachines.com/en/products-lmachine.html>.
- Cramer, S.D. e B.S. Covino. 2003. *ASM Handbook*. Vol. 13: ASM Internacional
- Cverna, Fran. 2001. *Worldwide guide to equivalent nonferrous metals and alloys*. Materials Park, Ohio: ASM International.
- Davis, Joseph R. 1993. *Aluminum and aluminum alloys*. ASM Specialty Handbook. Materials Park, Ohio: ASM International.
- Devloo, Philippe. 2005. "Simulação numérica " *MultiCiência*. Acedido a 27/05/2014. http://www.multiciencia.unicamp.br/artigos_04/a_06_.pdf.
- Duarte, Iberê R. 2004. *Fundição em coquilha por gravidade*. Joinville: Instituto Superior Tupy.
- Engineering, I. 2013. *Induga Low Pressure Die Casting Machine 1011*. Germany: INDUGA.
- "European Aluminium Association ". 2014. Acedido a 19/02/2014. <http://www.alueurope.eu/>.
- "FEM and FDM". 2014. Acedido a 27/05/2014. http://www.simtec-inc.com/fem_vs_fdm.htm.
- Fernandes, João. 2014. *Alumínio - mecanismos de corrosão e protecção*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Ferreira, José M. G. de Carvalho. 1999. *Tecnologia da Fundição*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- "Finite element method". 2014. Acedido a 27/05/2014. http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method.
- Fontinha, Isabel Rute e Maria Manuela Salta. 2004. Comportamento do alumínio anodizado à corrosão atmosférica. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil http://www.apal.pt/pdf/ET_02.pdf.
- Fontinha, Isabel Rute, Maria Manuela Salta e Gonçalo Vítor. 2006. *Influence of sealing process on corrosion behaviour of anodized aluminium*. Lisboa: LNEC.
- Foseco. 2007. *Dycote Manual - Coatings for non-ferrous metal die-casting*. Foseco International Limited.
- . 2013. *Foseco Casting Filters*. Foseco International Limited.
- Guofa, Mi, Liu Xiangyu, Wang Kuangfei e Fu Hengzhi. 2008. *Numerical Simulation of Low Pressure Die-Casting Aluminium Wheel*. China: China Foundry.
- Hatch, John E. 1984. *Aluminium properties and physical metallurgy*. Ohio: American Society for metals.
- INDUGA. 2013. *Low Pressure Die Casting Machine*. Germany: INDUGA.
- Jer-Haur, Kuo, Hsu Feng-Lin e Hwang Weng-Sing. 2001. "Development of an interactive simulation system for the determination of the pressure time relationship during the filling in a low pressure casting process." *Science and Technology of Advanced Materials*. <http://stacks.iop.org/1468-6996/2/i=1/a=A30>.
- Jorstad, J. 2009. *Pressure assisted processes for high integrity aluminium castings - part I*. Virgínia, USA: JIJ Technologies.
- Kalpajian, Serope e Steven Schmid. 2009. "Manufacturing Engineering and Technology." no. 6th.

- Kaufman, John Gilbert. 1999. *Properties of aluminum alloys tensile, creep, and fatigue data at high and low temperatures*. Materials Park, Ohio: ASM International.
- KS Aluminium-Technologie. 2013. Low pressure die casting - Cylinder Blocks. Germany: KS Aluminium-Technologie AG.
- Kurtz, Lothar Hartmann;. 2007. Low Pressure Casting - a process which pays off. Em *11th International Trade Fair for Foundry Dusseldorf*.
- LEAMPE. 2014. "LEAMPE low-pressure casting". Acedido a 08/04/2014.
<http://www.laempe.com/en/products/casting-solutions/low-pressure-casting/>.
- Magalhães, António Pinto Barbedo. 1993. *Fundição em Coquilha*. [s. n.]: [s. n.].
- Marques, Flávio. 2010. *Desenvolvimento do processo de vazamento em coquilhas rotativas*. Porto: FEUP.
- Martins, Laura. 2012. *Anodização e Coloração de Peças de Alumínio*. Porto: FEUP/DEEC.
- Melo, Pedro. 2014. "Simulação do enchimento e solidificação de peças em ligas de cobre por fundição de baixa pressão", FEUP.
- Mesquita, Adolfo Sá. 1971. *Tecnologia da fundição de ligas de alumínio*. Metalurgia. Lisboa: INII.
- Metgraphite. 2014. "Processo de desgaseificação do alumínio". Acedido a 10/06/2014.
<http://www.metgraphite.com.br/desgaseificacao.htm>.
- Monteiro, António. 1996. "Estudo do comportamento térmico de moldações metálicas para fundição aplicando o método das diferenças finitas generalizadas", Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho.
- NASA. 2014. "ANTHROPOMETRY AND BIOMECHANICS". Acedido a 19/05/2014.
<http://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm>.
- Neto, Rui. 1985. *As ligas de alumínio em fundição*. Porto: FEUP.
- . 2014. *Apontamentos da disciplina de Tecnologia de Moldação*. Porto: FEUP.
- Novais, Carla. 2000. *Caracterização de escórias de alumínio resultantes da forma de fusão da indústria de fundição em areia, coquilha e função injectada*. Porto: [s. n.].
- Péchiney, Barrant Pierre Gadeau Robert. 1964. *L'Aluminium par les ingénieurs du Groupe Pechiney*. Paris: Eyrolles
- Ravi, B. 2010. *Casting Simulation - Best Practices*. Indian Foundry Congress: Indian Institute of Technology Bombay.
- Reeve, M. R. 1961. *Present trends in methods of production of aluminium alloy slabs and billets for working*. England: Foseco International Limited.
- Rintala, Tom. 1996. "Diesel fuel injection equipment". Acedido a 12/06/2014.
<http://lipas.uwasa.fi/cs/publications/2NWGA/node189.html>.
- Santos, João 2012. *Análise de ligas e revestimentos resistentes à corrosão: o caso da STA*. Porto: FEUP.
- Silva, Lucas Filipe Martins da, Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte e ViriatoTeixeira de Abreu Antunes. 2008. *Problemas e trabalhos práticos de metalurgia*. Manual. Porto: FEUP
- "Switchgear". 2014. Acedido a 31/04/2014. <http://en.wikipedia.org/wiki/Switchgear>.
- Torre, Jorge. 2004. *Manual Prático de Fundição*. [s. n.]: Hemus.
- Uddeholm. 2014a. Uddeholm Orvar Supreme. <http://www.ramada.pt/arq/fich/orvar2microdized-english.pdf>.
- . 2014b. Uddeholm Vidar Superior. <http://www.ramada.pt/arq/fich/Cat - VIDAR SUPERIOR - english.pdf>.
- Vijayaram, Thoguluva Raghavan. 2012. *Counter Pressure Casting Technique for Aluminium Foundries*. Malaysia: MMU University.
- Zhang, B., S. L. Cockcroft, D. M. Maijer, J. D. Zhu e A. B. Phillion. 2005. *Casting defects in low-pressure die-cast aluminum alloy wheels*. Vol. 57, JOM: Springer-Verlag.
- Zhang, Liqiang. 2001. *Inverse calculation of interfacial heat transfer coefficient during casting solidification and the LPDC process optimization for thin-walled casting of aluminium alloy*. China: Central South University.

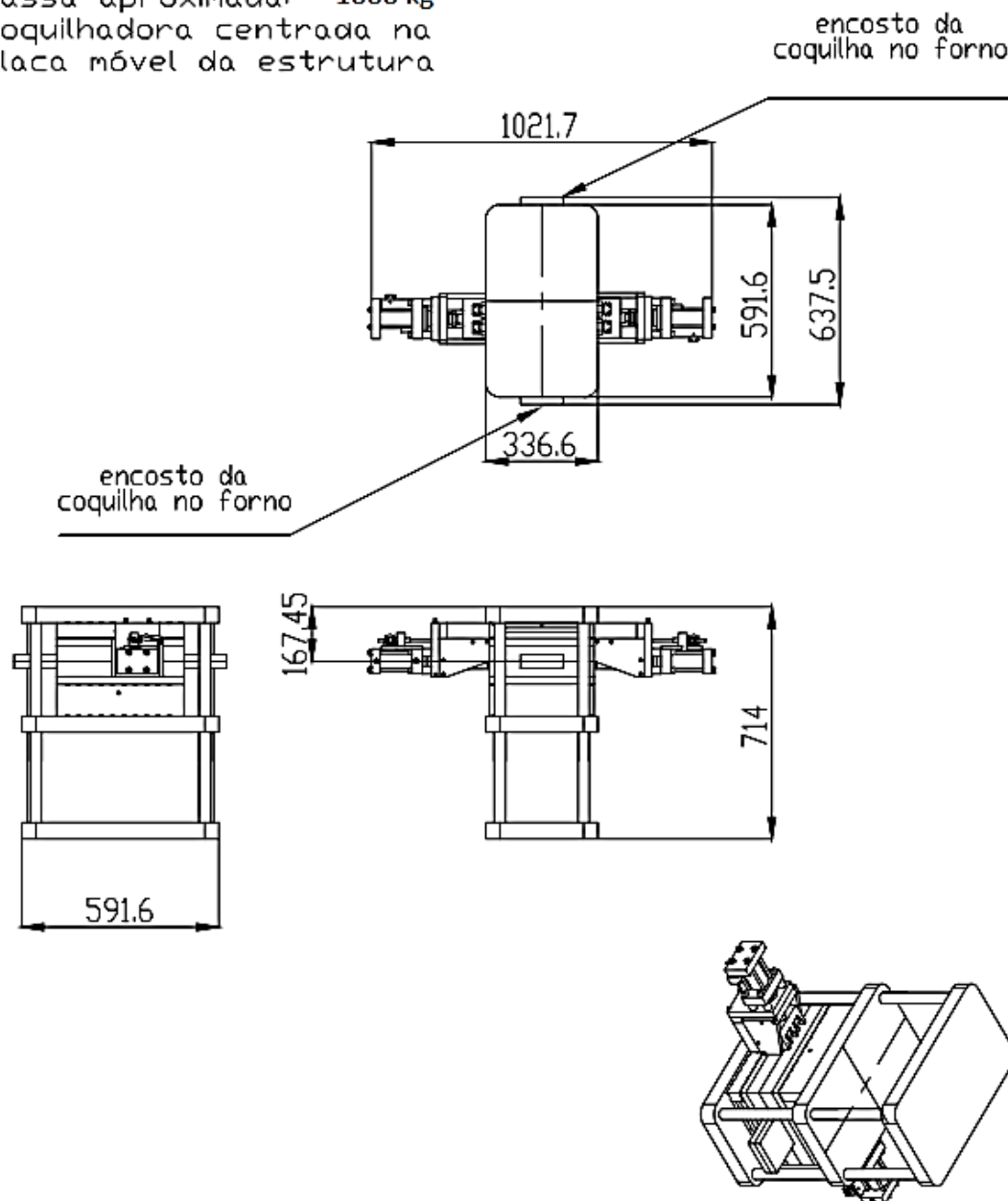
Anexo A: Desenho 2D do conjunto da estrutura



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION			
NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE					
DRAWN													
CHK'D													
APP'D													
WFG													
Q.A.													
				MATERIAL:				DWG NO. conjunto_todo				A4	
				WEIGHT:				SCALE: 1:50				SHEET 1 OF 1	

Anexo B: Desenho 2D do conjunto da coquilhadora

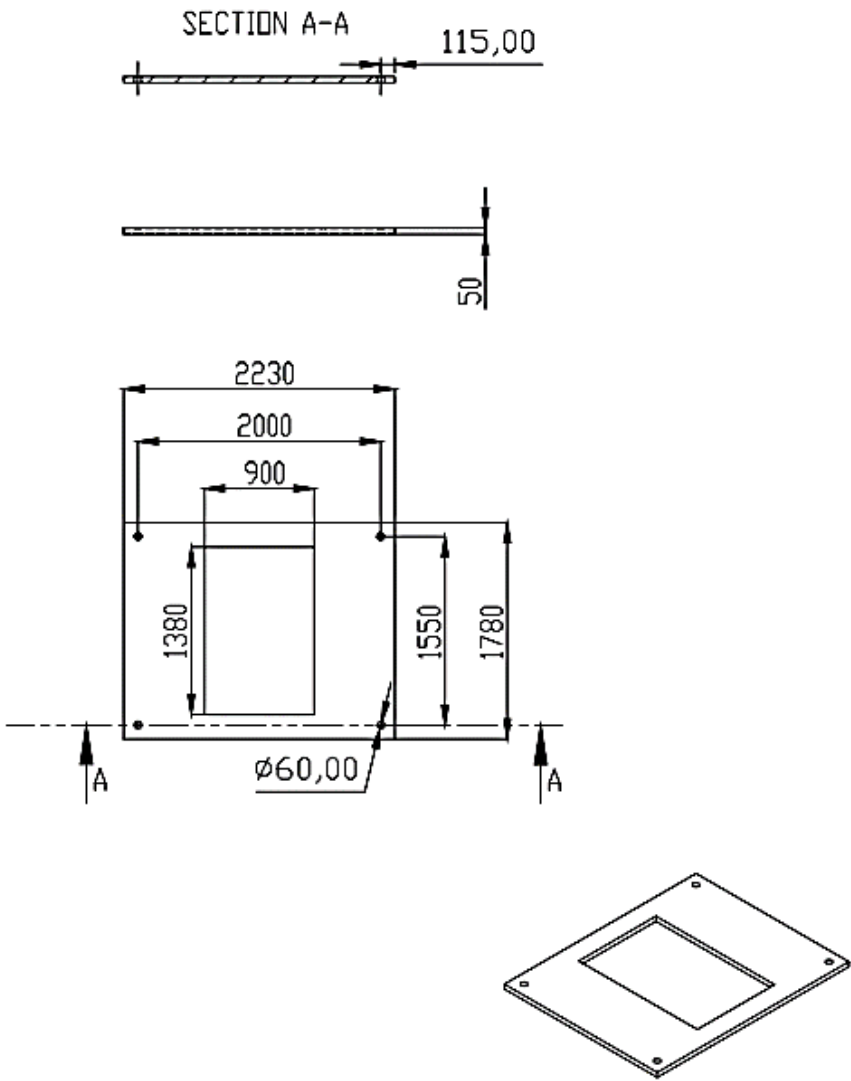
Massa aproximada: - 1000 kg
Coquilhadora centrada na placa móvel da estrutura



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH				TOLERANCES		LINEAR		ANGULAR			
NAME	SIGNATURE	DATE								TITLE	
RAVN										Coquilhadora	
CHC											
UPV/D											
W/S											
2A				MATERIAL				DWG NO.		A4	
				WEIGHT				SCALE/1:20		SHEET 1 OF 1	

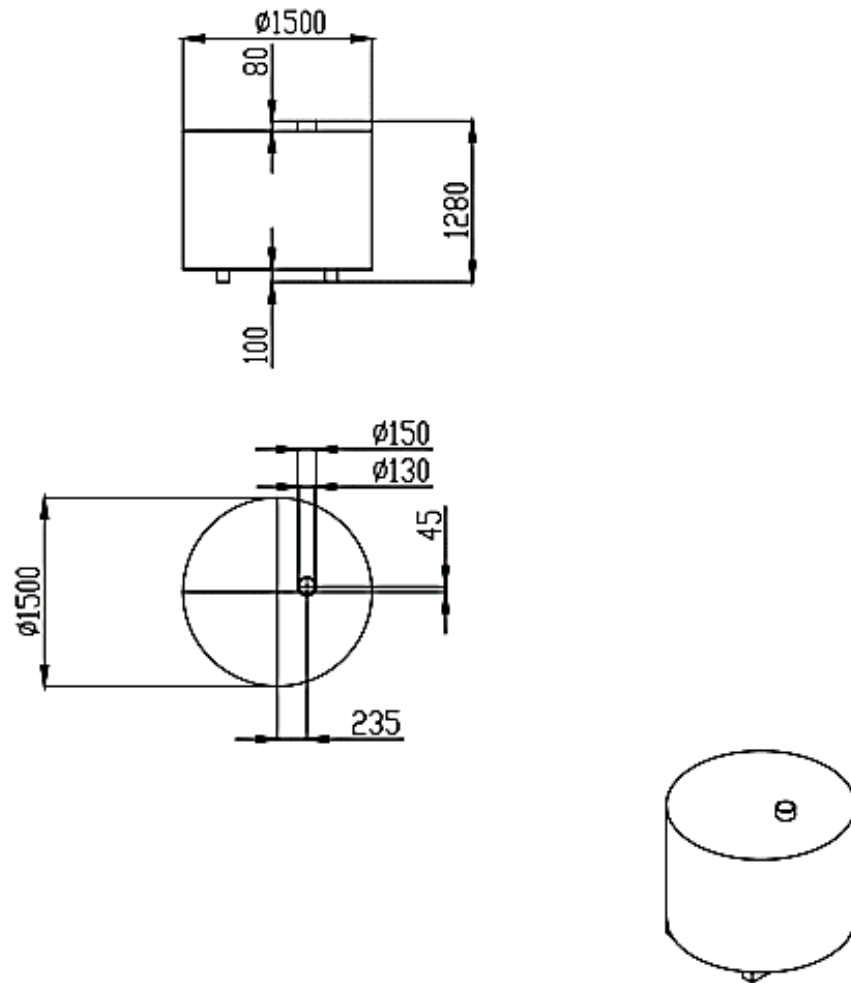
Anexo C: Desenho 2D da placa móvel

Massa aproximada: 1045 kg
-coquilhadora centrada
na placa



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR ANGULAR		FINISH		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		1:1 NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE	
RAWN							

Anexo D: Desenho 2D do forno



LESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS PAGE FOURTH TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:						FINISH:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE				
OWN											
C'D											
P/V/D											
\$											
				MATERIAL:			DWG NO.	forno			A-
				WEIGHT:			SCALE: 1:50	SHEET 1 OF 1			

Anexo E: Desenho do puxador

